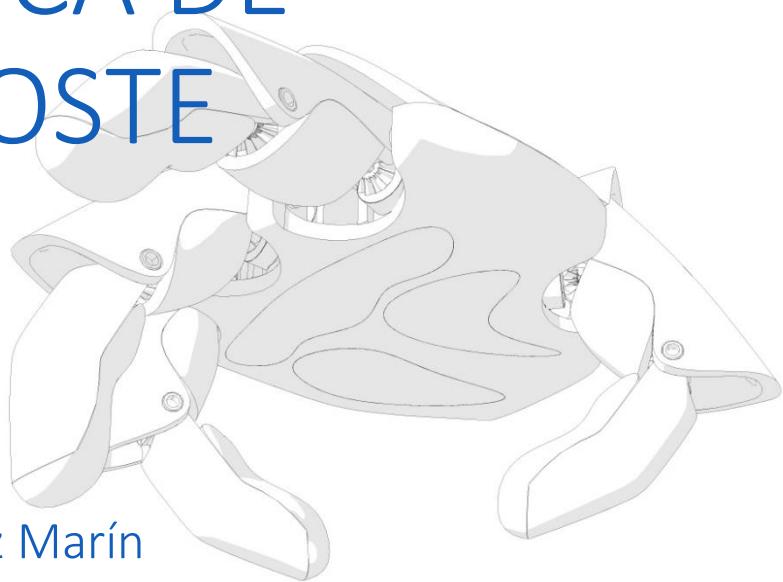




Universidad
Carlos III de Madrid

Universidad Carlos III de Madrid

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA MANO ROBÓTICA DE BAJO COSTE



Jorge Rodríguez Marín

21 de junio de 2014

Tutores:

Juan Carlos González Vicores

Santiago Martínez de la Casa

Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales

Tabla de contenidos

ÍNDICE DE TABLAS	4
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	6
AGRADECIMIENTOS.....	10
RESUMEN	12
ABSTRACT	14
1. INTRODUCCIÓN	16
1.1 INTRODUCCIÓN.....	16
1.2 OBJETIVOS	16
1.3 ESTRUCTURA	16
2. ANÁLISIS.....	18
2.1 ANÁLISIS FUNCIONAL	18
2.1.1 Estudio anatómico de una mano humana.....	18
2.1.2 Antropomorfismo	24
2.1.3 Destreza, Dexterity.....	25
2.1.4 Taxonomías y sinergias	25
2.1.5 Tipología	29
2.2 ANÁLISIS HARDWARE.....	30
2.2.1 Actuadores.....	30
2.2.2 Transmisión.....	32
2.2.3 Fuerza en la huella de la falange distal.....	33
2.2.4 Presupuesto	33
2.2.5 Peso.....	33
2.2.6 Integración de los actuadores.....	33
2.3 COMPARATIVA DE MANOS ROBÓTICAS.....	34
2.4 PROGRAMAS INFORMÁTICOS	43
2.4.1 Diseño CAD	43
2.4.2 Análisis FEM.....	45
3. CICLO DE DISEÑO.....	48
3.1 METODOLOGÍA DE DISEÑO.....	48
3.2 PROTOTIPO 1	49
3.2.1 Componentes y características del prototipo.....	49
3.2.2 Revisión 1: Conceptualización.....	50
3.2.3 Revisión 2: Diseño orientado a la fabricación	53
3.2.4 Simulación	55
3.2.5 Fabricación y puesta en marcha	57
3.2.6 Análisis de resultados	59
3.3 PROTOTIPO 2	60
3.3.1 Componentes y características del prototipo.....	60
3.3.2 Revisión 3: Diseño orgánico e integración de servos	61
3.3.3 Simulación	70
3.3.4 Fabricación y puesta en marcha	73

3.3.5	Análisis de resultados	76
4.	PRESUPUESTO	78
5.	CONCLUSIONES Y MEJORAS FUTURAS	80
	Prototipo 1.0	80
	Prototipo 2.0	80
	Futuras mejoras	81
	Conclusiones	81
	BIBLIOGRAFÍA	82
	ANEXOS.....	86
	PLANOS COJINETES IGUS.....	86
	GFM-0405-03.....	86
	GFM-0304-02.....	86
	GFM-0304-03.....	86

Índice de tablas

Tabla 1: Validez de acción según la forma de la punta del dedo [10]	24
Tabla 2: Tabla comparativa actuadores I [32]	31
Tabla 3: Tabla comparativa actuadores II [32]	32
Tabla 4: Tabla comparativa transmisiones [32]	33
Tabla 5: Tabla de características prototipo 1.0	49
Tabla 6: Tabla de características prototipo 2.0	61
Tabla 7: Características engranajes revisión 3	63
Tabla 8: Especificaciones GFM-0405-03	86
Tabla 9: Especificaciones GFM-0304-02	86
Tabla 10: Especificaciones GFM-0304-03	86

Índice de ilustraciones

Ilustración 1: Huesos, ©Sara Simblet	18
Ilustración 2: Uniones de los dedos y del pulgar [4]	19
Ilustración 3: Ligamentos metacarpofalángicos e interfalángicos, [4]	19
Ilustración 4: Antebrazo derecho, visiones posteriores, [5]	20
Ilustración 5: Uniones y grados de libertad de una mano humana [6]	21
Ilustración 6: Longitud de la mano, [9]	22
Ilustración 7: Longitud de la mano, Frecuencia absoluta, [9]	22
Ilustración 8: Anchura de la mano, [9]	22
Ilustración 9: Anchura de la mano, Frecuencia absoluta, [9]	22
Ilustración 10: Longitud del dedo índice, [9]	22
Ilustración 11: Longitud del dedo índice, Frecuencia absoluta, [9]	22
Ilustración 12: Anchura proximal dedo índice, [9]	23
Ilustración 13: Anchura proximal dedo índice, Frecuencia absoluta, [9]	23
Ilustración 14: Anchura distal dedo índice, [9]	23
Ilustración 15: Anchura distal dedo índice, Frecuencia absoluta, [9]	23
Ilustración 16: Sección Sagital, [5]	24
Ilustración 17: Obtención de sinergias mediante sensores MRI [6]	26
Ilustración 18: Sinergias posturales [6]	26
Ilustración 19: Taxonomía Cutkosky, [44]	27
Ilustración 20: Taxonomía Bullock [24]	28
Ilustración 21: Taxonomía Bullock - Manipulación prensil en mano [24]	29
Ilustración 22: Ejemplo de un dedo de tipología subactuada [29]	30
Ilustración 23: Actuadores posibles en manos robóticas, [32].	31
Ilustración 24: Okada Hand	34
Ilustración 25: Stanford/JPL Hand	34
Ilustración 26: Utah/M.I.T. Hand[1]	34
Ilustración 27: LMS Hand	35
Ilustración 28: Robonaut Hand [35]	35
Ilustración 29: Robonaut 2 Hand [19, 23]	35
Ilustración 30: Shadow Hand [36]	35
Ilustración 31: ACT Hand [37]	36
Ilustración 32: UB Hand III [21]	36
Ilustración 33: UB Hand IV	36
Ilustración 34: Cyberhand	36
Ilustración 35: Belgrade/USC Hand	37
Ilustración 36: DIST Hand	37
Ilustración 37: Tokyo Hand	37
Ilustración 38: EH1 Hand [17]	38
Ilustración 39: Hand Arm System [31]	38
Ilustración 40: Barret Hand	38
Ilustración 41: iGRIPP Hand [38]	39
Ilustración 42: SARA Hand [27]	39
Ilustración 43: DLR Hand I	39
Ilustración 44: DLR Hand II [12]	40
Ilustración 45: Twendy-One Hand	40

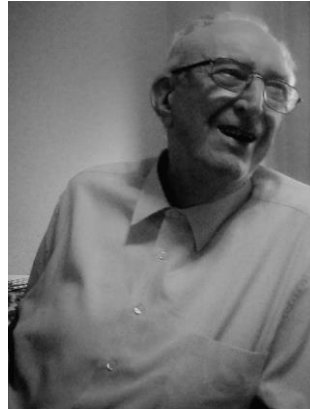
Ilustración 46: MEKA Hand	40
Ilustración 47: Dexhand [10]	40
Ilustración 48: KITECH Hand [15]	41
Ilustración 49: Fluidhand III	41
Ilustración 50: Gifu Hand II [18]	41
Ilustración 51: Gifu Hand III [40]	41
Ilustración 52: i-Limb	42
Ilustración 53: ELU2 Hand [30]	42
Ilustración 54: UNIP Hand	42
Ilustración 55: Ultralight Hand	42
Ilustración 56: GCUA Hand [41]	42
Ilustración 57: iCub Hand [28, 42]	43
Ilustración 58: Ritsumeikan Hand [29]	43
Ilustración 59: Schunk Hand [20]	43
Ilustración 60: Interfaz de Solidworks 2014	44
Ilustración 61: Interfaz de Rhinoceros V5	44
Ilustración 62: Interfaz de Catia V5	45
Ilustración 63: Interfaz Ansys Mechanical	46
Ilustración 64: Interfaz Generative Structural Analysis de Catia	46
Ilustración 65: Metodología de diseño	48
Ilustración 66: Dibujo 3D del servomotor	50
Ilustración 67: Mano fotografiada	51
Ilustración 68: Dibujo palma preliminar	51
Ilustración 69: Dedo completo preliminar	52
Ilustración 70: Prototipo 1.0 - Diseño conceptual 1	53
Ilustración 71: Prototipo 1.0 - Diseño conceptual 2	53
Ilustración 72: Guía de la correa	54
Ilustración 73: Demostración de uso de la guía de la correa	54
Ilustración 74: Diseño final prototipo 1.0 - Vista inferior	55
Ilustración 75: Diseño final prototipo 1.0 - Vista superior	55
Ilustración 76: Prototipo 1.0 - Agarre bolígrafo 1	56
Ilustración 77: Prototipo 1.0 - Agarre bolígrafo 2	56
Ilustración 78: Prototipo 1.0 - Agarre botella 1	56
Ilustración 79: Prototipo 1.0 - Agarre botella 2	56
Ilustración 80: Prototipo 1.0 - Agarre pelota 1	56
Ilustración 81: Prototipo 1.0 - Agarre pelota 2	56
Ilustración 82: Prototipo 1.0 - Agarre portatizas 1	57
Ilustración 83: Prototipo 1.0 - Agarre portatizas 2	57
Ilustración 84: Prototipo 1.0 - Agarre rotulador 1	57
Ilustración 85: Prototipo 1.0 - Agarre rotulador 2	57
Ilustración 86: Simulación del gcode de las falanges proximal y distal	58
Ilustración 87: Prototipo 1.0 - Prueba de un dedo robótico	58
Ilustración 88: Fabricación prototipo 1.0 1	59
Ilustración 89: Fabricación prototipo 1.0 2	59
Ilustración 90: Prototipo 1.0 en el humanoide TEO	59
Ilustración 91: Partes del servomotor TowerPro MG-90	62
Ilustración 92: Plataforma para validar la idea del desmontaje del servo	63
Ilustración 93: Engranaje M0.8, PA20, Z12, FW12, 5 mm diámetro nominal	64

Ilustración 94: Ejemplo de generación de una superficie con NURBS	65
Ilustración 95: Falange proximal con servo integrado	65
Ilustración 96: Ejemplo separación falange proximal y huella	66
Ilustración 97: Ejemplos de huella proximal con diferentes materiales	66
Ilustración 98: Dedo completo prototipo 2.0 - 1	67
Ilustración 99: Dedo completo prototipo 2.0 - 2	67
Ilustración 100: Dedo completo prototipo 2.0 - 3	67
Ilustración 101: Dedo completo prototipo 2.0 - 4	67
Ilustración 102: Análisis FEM en falange proximal 20N deformación 0,06mm	67
Ilustración 103: Análisis FEM en falange proximal 20N deformación 0,38mm	67
Ilustración 104: Cuna de prueba para el alojamiento de los servos proximales	68
Ilustración 105: Prototipo 2.0 con dedos y palma inferior	69
Ilustración 106: Palma con servos alojados	69
Ilustración 107: Prototipo 2.0 diseño completo - 1	70
Ilustración 108: Prototipo 2.0 diseño completo - 2	70
Ilustración 109: Simulación prototipo 2.0 - Baraja	71
Ilustración 110: Simulación prototipo 2.0 - Bolígrafo	71
Ilustración 111: Simulación prototipo 2.0 - Botella grande	71
Ilustración 112: Simulación prototipo 2.0 - Cantimplora	71
Ilustración 113: Simulación prototipo 2.0 - Cazo	71
Ilustración 114: Simulación prototipo 2.0 - Copa de cava	71
Ilustración 115: Simulación prototipo 2.0 - Cuchara	71
Ilustración 116: Simulación prototipo 2.0 - Destornillador	71
Ilustración 117: Simulación prototipo 2.0 - Libro	72
Ilustración 118: Simulación prototipo 2.0 - Llavero	72
Ilustración 119: Simulación prototipo 2.0 - Pelota de baloncesto	72
Ilustración 120: Simulación prototipo 2.0 - Pelota de tenis	72
Ilustración 121: Simulación prototipo 2.0 - Piano	72
Ilustración 122: Simulación prototipo 2.0 - Pila AA	72
Ilustración 123: Simulación prototipo 2.0 - Portatizas	72
Ilustración 124: Simulación prototipo 2.0 - Rotulador gordo	72
Ilustración 125: Simulación prototipo 2.0 - Soldador	73
Ilustración 126: Simulación prototipo 2.0 - Teclado de ordenador	73
Ilustración 127: Visualizador Gcode Repetier-Host. Falange Proximal.	73
Ilustración 128: Dedo índice fabricado por SLS en PA2200	74
Ilustración 129: Comparación de tecnologías de fabricación. FDM de bajo coste vs SLS	74
Ilustración 130: TowerPro MG90 desmontado	74
Ilustración 131: Limpieza de las piezas con alcohol	74
Ilustración 132: Dedo índice con imanes y casquillos montados.	75
Ilustración 133: Integración completa del servo dentro de la cuna de la falange.	75
Ilustración 134: Dedo completo con dedo humano de referencia	76
Ilustración 135: Comparación de engranajes cónicos rectos vs cónicos helicoidales	81
Ilustración 136: Igus GFM (Iglidur G, Forma F, Métrica)	86

Agradecimientos

Dedico este trabajo a quien fui, a quien soy y, especialmente, a quien seré. Siempre pensaste que tú eres tú por lo que te rodea y quien te rodea. Tu familia y tus amigos siempre fueron esos héroes de los que siempre encuentras cosas que forman la imagen del ser en quien quieres convertirte. Fuiste lo que eres por ellos, y este trabajo es la suma del esfuerzo por intentar alcanzar lo que siempre has querido ser.

De todas las personas que me forman quería agradecerse en especial al tío Manuel, no por quien fue, sino por la imagen que siempre tuve de él.



“La cortina de la ducha es para que no se salga el agua, no para que no te vean.”

Resumen

Este trabajo de fin de grado tiene como finalidad el diseño y construcción de una mano robótica actuada. En la actualidad laboratorios y empresas de todo el mundo tienen como producto u objetivo de diseño una mano robótica que realice tareas similares a las que la de un ser humano puede hacer. Desde personas con discapacidad funcional, pasando por humanoides hasta dispositivos de manipulación en el mundo corporativo, el deseo de hacer una mano robótica funcional es patente.

En base a esta motivación, en las siguientes páginas se va a explicar y detallar el diseño y la implementación de una mano robótica. El trabajo comienza con un bloque de análisis donde se hará un estudio funcional de una mano humana así como la explicación de algunos conceptos y clasificaciones de las manos robóticas. Continúa un análisis de hardware donde se verán todas las posibles soluciones que se pueden dar en este aspecto. Una vez concluido el estudio y presentado el estado del arte de manos robóticas, se explica el proceso de diseño e implementación de dos prototipos funcionales de una mano robótica. Este proceso comienza explicando el diseño del prototipo, seguido de una parte de análisis donde se demuestran las habilidades teóricas del prototipo, y termina mostrando la fabricación y montaje del prototipo en sí. La memoria concluye haciendo un análisis de los resultados de ambos prototipos con unas conclusiones y futuras mejoras que presenta el autor.

Mientras que sin duda esta mano robótica tiene que ser validada por personas amputadas o incapacitadas, así como por robots, este trabajo tiene como fin explicar el proceso de creación de una mano robótica actuada desde cero como alternativa a todo lo que los laboratorios o mercado actual nos pueden ofrecer.

Abstract

This project is focused on the design, manufacture and assembly of an actuated robotic hand. Currently, laboratories and companies around the world have a robotic hand that can perform tasks similar to those that a human being can do as product design or purpose. From people with physical disabilities, to humanoids and manipulation devices in the corporate world, the desire to create a functional robotic hand is present.

Based on this motivation, in the following pages the development of an actuated robotic hand will be explained and detailed. The work begins with a block of analysis where a functional study of a human hand will be made and also the explanation of some concepts and classifications of robotic hands. It continues with a hardware analysis where all the possible solutions to this problem will be presented. Once concluded the study and presented the state of art of robotic hands, the process of design and implementation of two functional prototypes will be described. This process starts explaining the prototype's design, followed by an analysis part where the theoretical abilities of the hand are presented, and finish showing the fabrication and assembly process of the prototype. The work ends making an analysis of the results of both prototypes, with conclusions and future improvements presented by the author.

While certainly this robotic hand must be validated by people with functional diversity, as well as robots, this work aims to explain the process of creating an actuated robotic hand from scratch as an alternative to the market offer and scientific advances of worldwide laboratories.

1. Introducción

1.1 Introducción

A día de hoy laboratorios, centros de investigación y empresas de todo el mundo necesitan de manipuladores para poder operar y manipular una gran variedad de objetos. La búsqueda de una mano robótica que satisfaga todas las necesidades empezó alrededor de los años ochenta [1] pero, todavía en nuestros días no existe una oferta que responda con un buen compromiso de habilidades, capacidades y precio.

Este proyecto surge con el objetivo de hacer una mano robótica capaz, diestra y hábil enmarcándolo dentro de un contexto de bajo coste para que su desarrollo sea viable y sostenible. También se orienta desde una perspectiva holística teniendo en cuenta el diseño mecánico, electrónico y del control para conseguir así un producto independiente a la plataforma en la que se implante, ya sea robótica industrial, humanos o robótica humanoide. No obstante, el trabajo se integra dentro de la plataforma del humanoide TEO [2] donde será testada.

1.2 Objetivos

Los objetivos a alcanzar por el prototipo final están inspirados en [3] y son completados con algunos requisitos del autor. Estos objetivos siguen unas políticas de diseño tal que:

- **Tamaño humano:** el diseño ha de tener un tamaño que se considere humano.
- **Fuerza en la punta de los dedos humana:** la fuerza ha de ser equivalente a la de una mano real para poder agarrar objetos similares a las que un humano.
- **Ausencia de holgura en el movimiento:** para un control preciso.
- **Modularización:** y su consiguiente reducción del coste y complejidad.
- **Grados de libertad humanos:** para emular los movimientos de una mano se han de conseguir los mismos grados de libertad y actuación que los de una mano humana.
- **Numero de dedos:** el mismo número y en la misma posición que en la realidad.
- **Integración total en la misma mano:** tanto electrónica como actuadores han de ir integrados en la mano.
- **Montaje rápido:** al estar orientado a la investigación, el hecho de que tenga un mantenimiento mínimo y que el montaje del prototipo sea lo más escueto posible es una prioridad.
- **Bajo coste:** se deberán tener en cuenta aspectos económicos en el diseño

1.3 Estructura

La memoria comienza con un análisis funcional donde se recoge el funcionamiento de una mano humana, así como algunos conceptos y clasificaciones necesarios para enmarcar las manos robóticas (2.1), seguido de un análisis de hardware (2.2), donde se estudian todas las posibles soluciones que se pueden dar al diseño y construcción de manos robóticas, continúa con un estado del arte actual (2.3) y una discusión de los programas de diseño CAD y análisis FEM que serán utilizados (2.4).

Se sigue con un bloque del ciclo de diseño de los prototipos. Se inicia explicando la metodología de diseño (3.1) para luego definir los pasos en lo que se materializará en dos prototipos funcionales. A grandes rasgos la metodología de diseño será:

1. Análisis del estado del arte y elección de objetivos y características (3.2.1, 3.3.1).
2. Diseño mecánico y análisis FEM (3.2.2, 3.2.3, 3.3.2).
3. Simulación de capacidades y habilidades del prototipo (3.2.4, 3.3.3).
4. Fabricación y puesta en marcha (3.2.5, 3.3.4)

Posteriormente se hará un análisis de los resultados de la experiencia recogida en ambos prototipos (3.2.6, 3.3.5), seguido del presupuesto general del proyecto (4). La memoria concluirá con un capítulo de conclusiones y futuras mejoras (5) de lo aprendido en el diseño de las diferentes revisiones así como de su construcción.

2. Análisis

2.1 Análisis funcional

2.1.1 Estudio anatómico de una mano humana

Si se desea hacer un análisis del estado del arte completo también se ha de analizar cómo es una mano humana desde el punto de vista anatómico. En este epígrafe se comienza haciendo una distinción de las falanges y de sus uniones. Luego se analiza el funcionamiento. Posteriormente se consideran los grados de libertad y de actuación. Después se hace una recopilación de las medidas antropomórficas en las que se inspirará el prototipo. Y, por último, se analizará un dedo en su sección sagital.

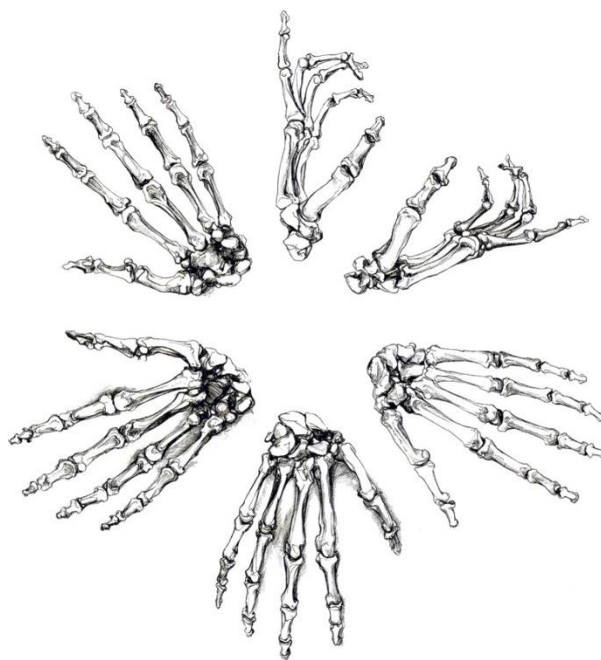


Ilustración 1: Huesos, ©Sara Simblet

2.1.1.1 Uniones interfalángicas

Desde un punto de vista anatómico, la mano se forma de 5 dedos que a su vez componen de 3 falanges como se puede ver en la Ilustración 1, Ilustración 2 y en la Ilustración 3. Se distinguen las falanges proximales, medias y distales. Las uniones que forman se utilizarán posteriormente para designar las piezas en el proceso de diseño y se distinguen las uniones del pulgar y las del resto de dedos. En la Ilustración 2 se muestran las uniones del pulgar y del índice:

- **DIP:** Distal interphalangeal joint
- **PIP:** Proximal interphalangeal joint
- **MC:** Metacarpophalangeal joint
- **IP:** Interphalangeal joint
- **MP:** Metacarpophalangeal joint
- **TMC:** Trapezometacarpal joint

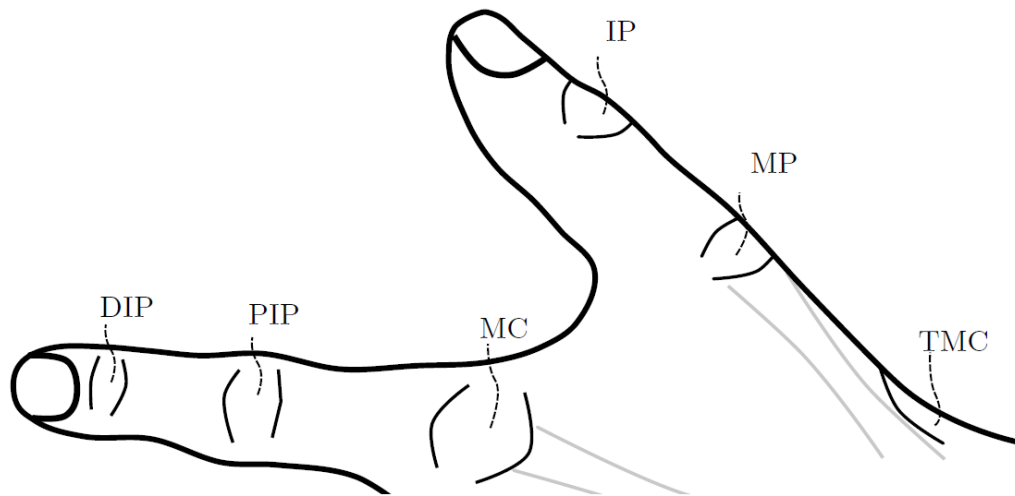


Ilustración 2: Uniones de los dedos y del pulgar [4]

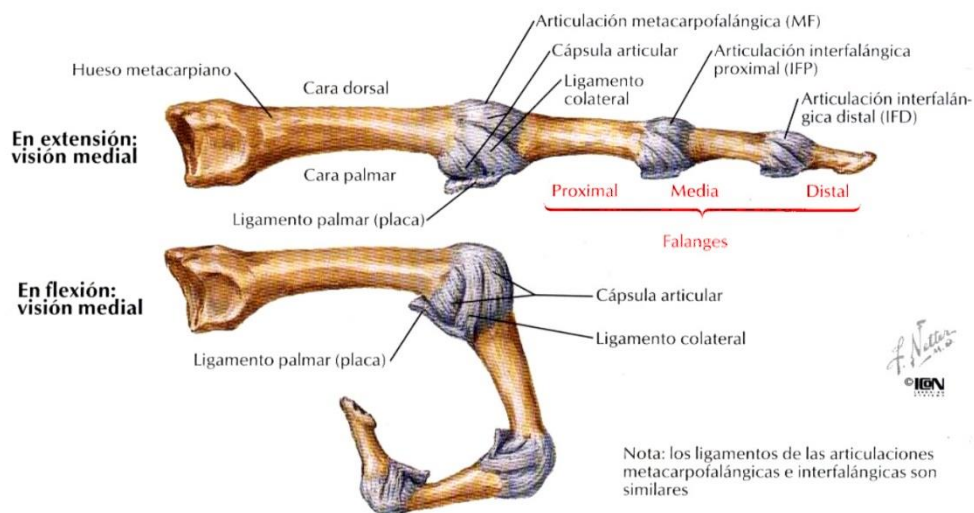


Ilustración 3: Ligamentos metacarpofalángicos e interfalángicos, [4]

2.1.1.2 Funcionamiento

Los movimientos del cuerpo humano los generan los músculos. Estos tienen la capacidad de contraerse o relajarse y, al estar unidos directamente a los huesos, el resultado final es la capacidad de generar un movimiento relativo entre dos huesos. Los músculos a las demás estructuras, como los huesos, se unen mediante tendones, mientras que los ligamentos dan estabilidad a las articulaciones óseas. Estos últimos se pueden apreciar en la MC, MIP y DIP de la Ilustración 3.

En la Ilustración 4 se muestran los músculos que realizan los movimientos de los dedos. Como se puede apreciar, unos músculos realizan la abducción y otros la extensión. Todos ellos se condensan en el antebrazo, lo que significa para realizar movimientos en los dedos, el ser humano necesita mano y antebrazo.

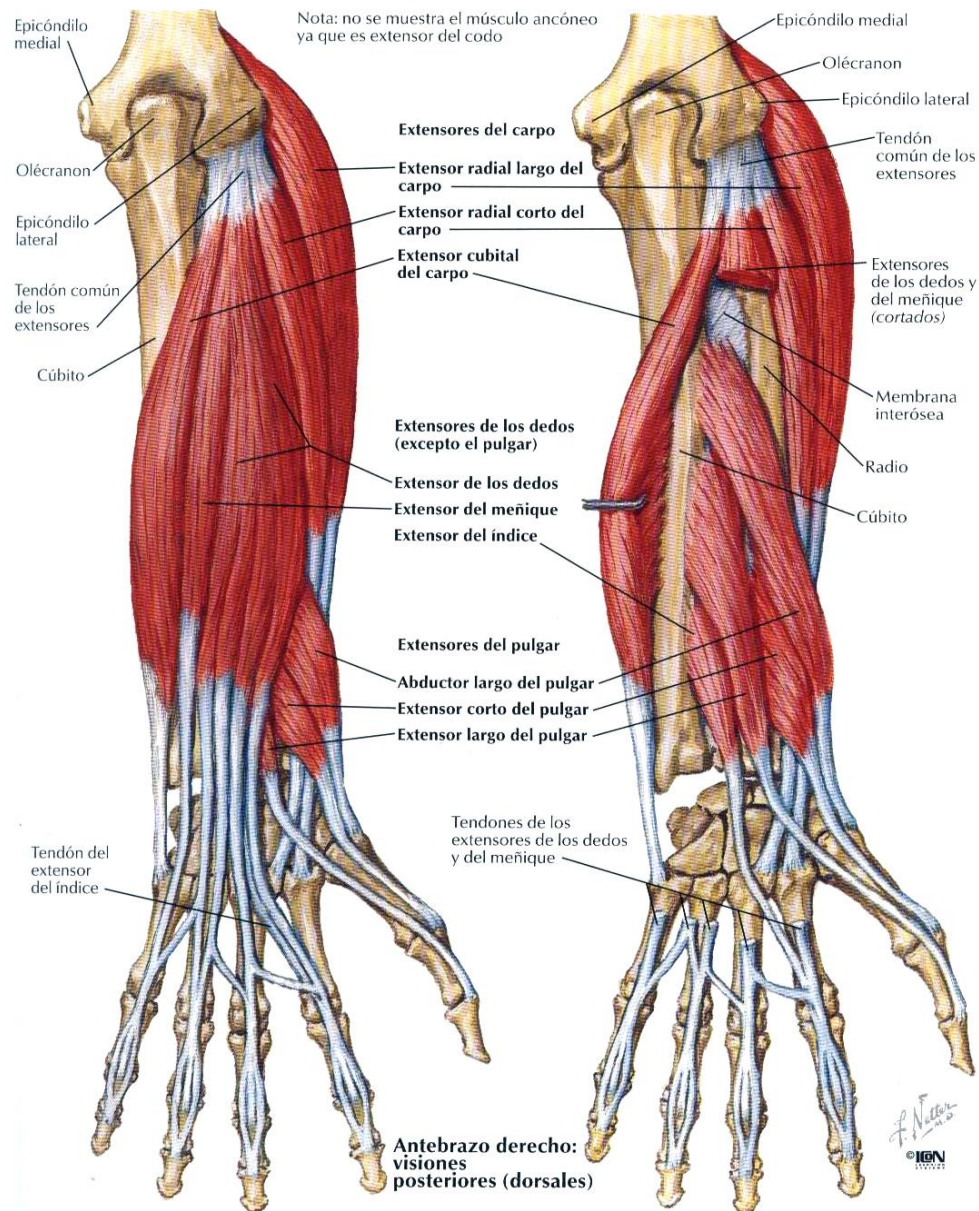


Ilustración 4: Antebrazo derecho, visiones posteriores, [5]

2.1.1.3 Grados de libertad y de actuación

Para posteriormente hacer un diseño realista de una mano humana, se ha de tener un modelo realista de la misma. En este trabajo centraremos el estudio en torno a [6] (Ilustración 5) donde se usa un modelo cinemático con 26 grados de libertad incluida la muñeca. Otros estudios utilizan 22 [7], o 29 [8]. En este trabajo no es necesario un modelo completamente realista de una mano sino una idea general y abstracta de los distintos grados de libertad y, en especial, de los dedos.

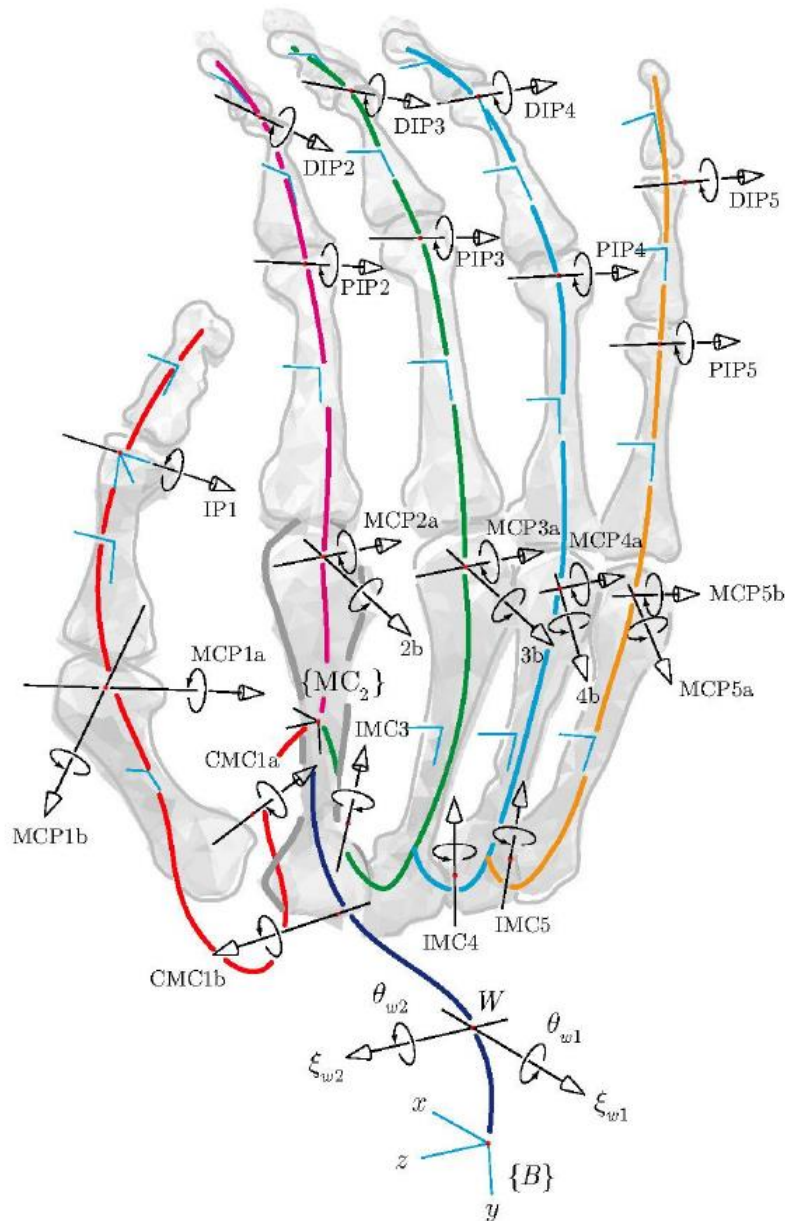


Ilustración 5: Uniones y grados de libertad de una mano humana [6]

2.1.1.4 Medidas antropométricas

El diseño de una mano humana supone hacer un estudio antropográfico de la misma desde el punto de vista estadístico. Para ello, en este proyecto se hace uso de los datos recogidos en [9]. En él se hace un análisis estadístico de distintas partes del cuerpo, aunque las aquí tenidas en cuenta solo corresponden con las de la mano.

A continuación se muestra una recopilación de los datos del libro mostrando las gráficas de distribución, el valor medio, el máximo y el mínimo. En la Ilustración 7 se muestra la longitud de la mano desde la muñeca hasta la punta del dedo corazón, en la Ilustración 9 la anchura de la mano, en la Ilustración 11 se puede ver la longitud del dedo índice, en el caso de la Ilustración 13 se muestra la anchura proximal del dedo índice y, por último, en la Ilustración 15, la anchura distal del dedo índice es presentada.

A la hora del diseño, se pondrá como objetivo la media y se considerará aceptable el rango comprendido entre el mínimo y el máximo, de las medidas estadísticas de los hombres. Un

análisis rápido muestra que los hombres tienen mayores medidas que las mujeres y, como en este trabajo no se contempla la distinción de género de la mano, el autor prefiere basar sus medidas en aquellas que son mayores (y por tanto más fáciles a la hora de diseñar) y, que en este caso, coincide con las medidas de los varones.

CARACTERÍSTICA

Longitud de la mano

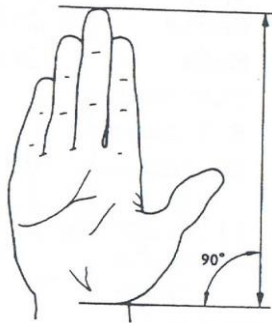


Ilustración 6: Longitud de la mano, [9]

DISTRIBUCIÓN

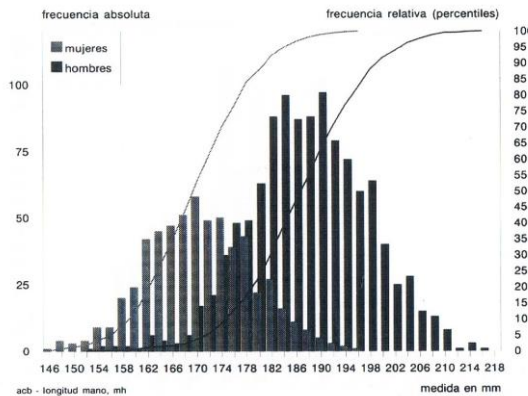


Ilustración 7: Longitud de la mano, Frecuencia absoluta, [9]

MÁXIMO,
MEDIA, MÍNIMO
(EN HOMBRES)

Máximo: 217,00
Media: 188,18
Mínimo: 148,00

Anchura de la mano

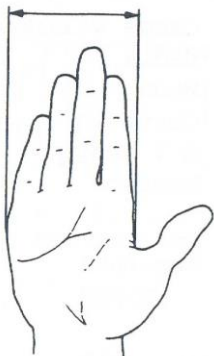


Ilustración 8: Anchura de la mano, [9]

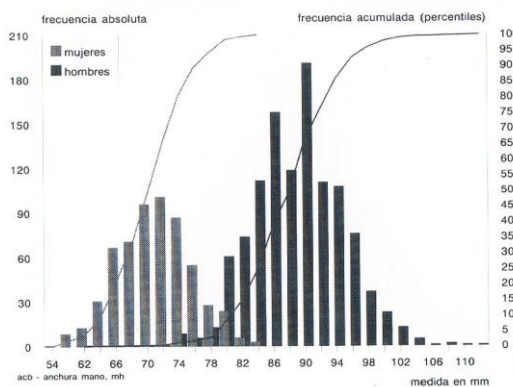


Ilustración 9: Anchura de la mano, Frecuencia absoluta, [9]

Máximo: 118,00
Media: 89,30
Mínimo: 54,00

Longitud del dedo índice



Ilustración 10: Longitud del dedo índice, [9]

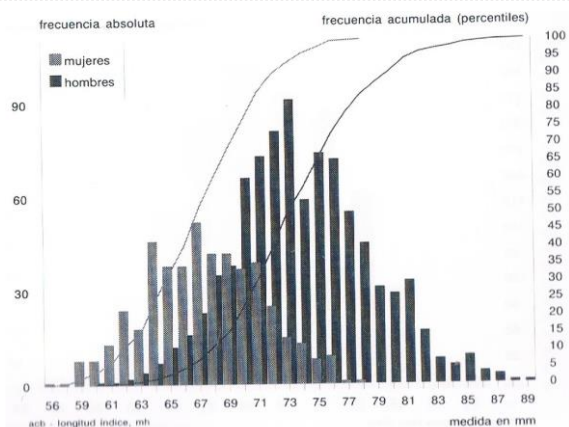


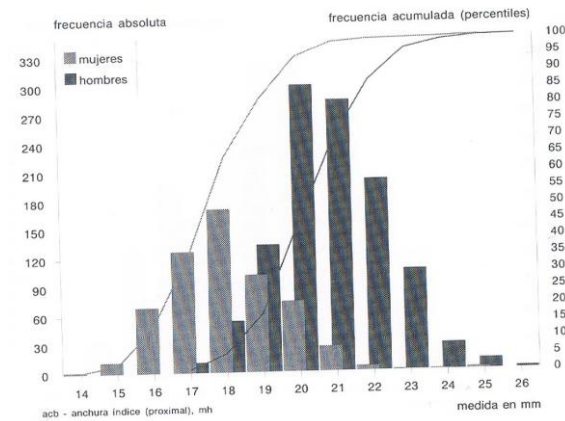
Ilustración 11: Longitud del dedo índice, Frecuencia absoluta, [9]

Máximo: 89,00
Media: 73,89
Mínimo: 58,00

Anchura proximal del dedo índice



Ilustración 12:: Anchura proximal dedo índice, [9]



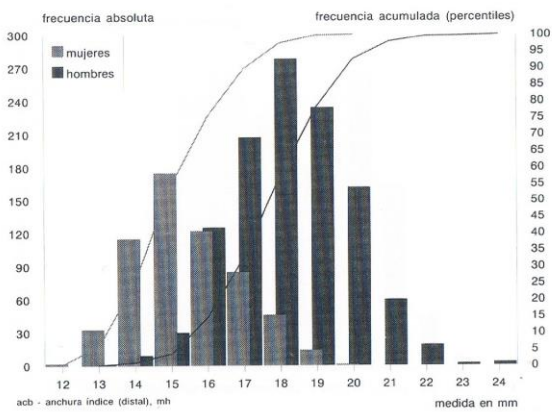
Máximo: 26,00
Media: 20,80
Mínimo: 7,00

Ilustración 13: Anchura proximal dedo índice, Frecuencia absoluta, [9]

Anchura distal del dedo índice



Ilustración 14: Anchura distal dedo índice, [9]





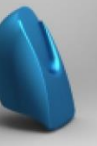

Máximo: 24,00
Media: 18,23
Mínimo: 13,00

Ilustración 15: Anchura distal dedo índice, Frecuencia absoluta, [9]

2.1.1.5 Sección sagital de un dedo. Huellas.

Para finalizar el estudio anatómico de la mano humana se estudia la forma de la punta de los dedos. En la actualidad existen pocos estudios acerca de cómo afecta la forma de los dedos al agarre [10] pero a continuación se presenta la Tabla 1, donde podemos ver una comparativa.

Tabla 1: Validez de acción según la forma de la punta del dedo [10]

	Square	Hemi-spherical	Variable curvature	Variable curvature flat end
Finger tip shape	 a.	 b.	 c.	 d.
Small object picking	+++	-	++	++
Rolling	--	+++	++	++
Maximum load on the finger tip during pinch grasp	++	-	+	+++

La gran mayoría de las manos actuales tienden a hacer formas geométricas simples o con algún acabado rugoso. Debido al requisito del autor de que el prototipo conserve una parecido humano, se intentará copiar la forma de un dedo. En la Ilustración 16, se puede apreciar el corte sagital de un dedo.

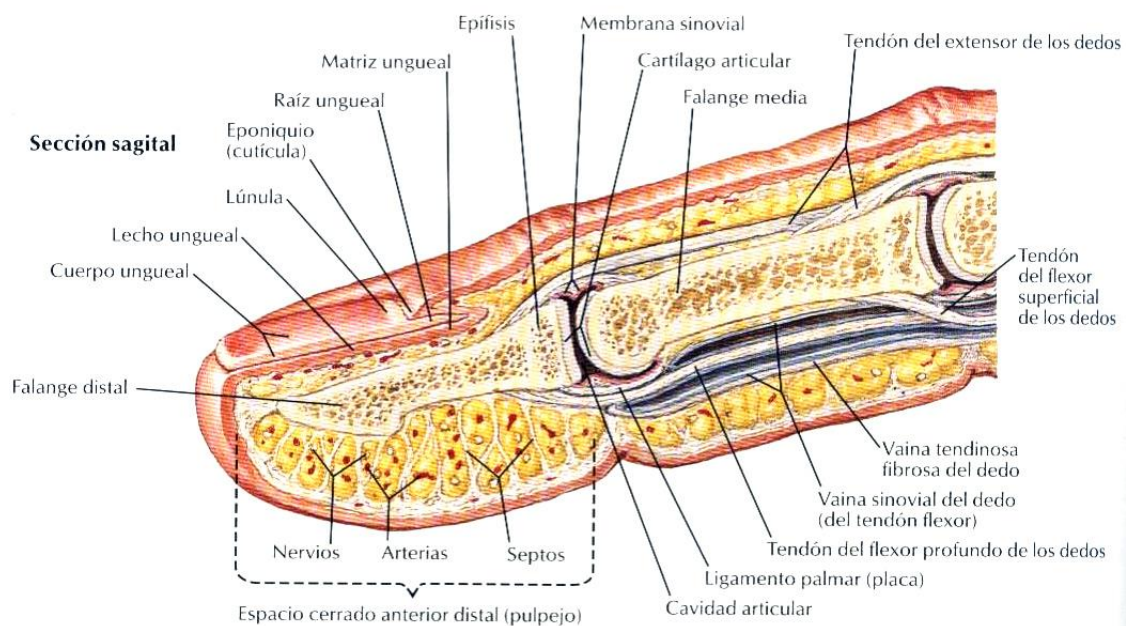


Ilustración 16: Sección Sagital, [5]

2.1.2 Antropomorfismo

Uno de los objetivos es que el prototipo se parezca lo máximo posible a una mano humana. Se entiende por *antropomórfico* al adjetivo que recibe una característica del prototipo por su similitud, respecto a las medidas en tamaño y forma, de una mano humana. En este proyecto se excluyen textura y rigidez, aunque si es algo a tener en cuenta a la hora del estudio del agarre.

Este grado de antropomorfismo se puede conseguir de varias maneras y aquí se distinguen cuatro:

2.1.2.1 Número de dedos

Aunque una característica propia de la raza humana es tener 5 dedos (4 más el pulgar) debido a las limitaciones tecnológicas, varias manos robóticas con espíritu antropomórfico [1, 11-16] se limitan a hacer tres dedos más pulgar. No es así en otros casos como en [17-21]. Se concluye que el objetivo del diseño será el de tener cuatro dedos más pulgar, aunque no se descarta el diseño de tres más pulgar en caso de limitación tecnológica o de forma de alguna clase.

2.1.2.2 Forma orgánica

La forma de mano en sí se ha afrontado de diferentes maneras según distintos laboratorios y proyectos. Se diferencian dos partes: por un lado esta aquella que da estructura y solidez al prototipo, mientras que por otro lado encontramos la parte que está en contacto con los objetos a manipular. Se pueden distinguir dos soluciones para conseguir la forma exterior característica de una mano:

- Esqueleto y recubrimiento: Inspirado en la anatomía humana, consiste en hacer una estructura base (el equivalente humano sería el esqueleto) sobre la cual se dispone algún tipo de recubrimiento, a modo de piel, que sería la que estuviese en contacto con los objetos. Ejemplos: [19, 21-23]
- Exoesqueleto: Inspirado en los insectos, la misma carcasa conforma la forma humana, es la que hace de estructura y además es la que trata con los objetos que se van a manipular. Ejemplos: [10, 11, 14, 20]

2.1.3 Destreza, Dexterity

Para distinguir las dos topologías de mano robótica, se ha de introducir el concepto de *Destreza* (comúnmente denominado en la literatura inglesa como *Dexterity*) y *las clasificaciones o taxonomías de los agarres*.

Respecto a la destreza, en este trabajo se va a adoptar la definición de [24] donde distingue dos tipos de uso de la palabra “Destreza” dentro de los artículos científicos y se opta por lo siguiente:

“En general, la manipulación diestra se refiere típicamente a manipulación que involucra una o más manos, y típicamente con movimiento ocurriendo dentro de la mano, también conocida como ‘manipulación en mano’. Destreza, sin embargo, también se utiliza para describir otro tipo de movimientos físicos como brazos y piernas (...). En este artículo, usaremos el término ‘manipulación diestra’ para referirse a manipulación en mano.”.

Así que se utilizará el concepto de destreza, o hacer una mano diestra, para referirse a aquellas manos capaces de manipular objetos por sí mismas y dentro de la misma mano como, por ejemplo, mover un lápiz dentro de los dedos. A esto se le denomina manipulación en mano.

2.1.4 Taxonomías y sinergias

Para afrontar el problema de la funcionalidad de una mano en la actualidad se plantean dos soluciones diferentes: Sinergias y taxonomías.

2.1.4.1 Sinergias

Por un lado se encuentra el enfoque de las sinergias [6, 7, 25]. Esto es, analizar desde un punto de vista estadístico, que posición tiene una mano humana a la hora de realizar algún tipo de acción, ya sea agarre, posición o gesto.

Este enfoque estadístico se analiza viendo las diferentes posiciones que adquiere una mano humana mediante sensores de posición (Ilustración 17), acelerómetros o TAC (Tomografía axial computarizada), entre otros.

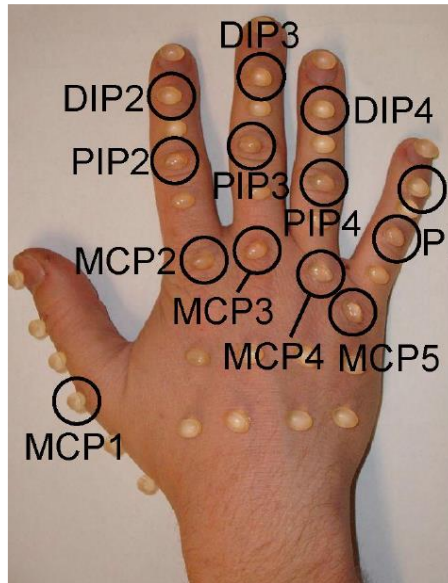


Ilustración 17: Obtención de sinergias mediante sensores MRI [6]

La filosofía de esta postura, aplicada al diseño de manos robóticas, es que si se pueden analizar las posturas y conjuntos de posturas (sinergias) que hace una mano real, solo habrá que enfocar el diseño a que el prototipo sea capaz de alcanzar esas sinergias.

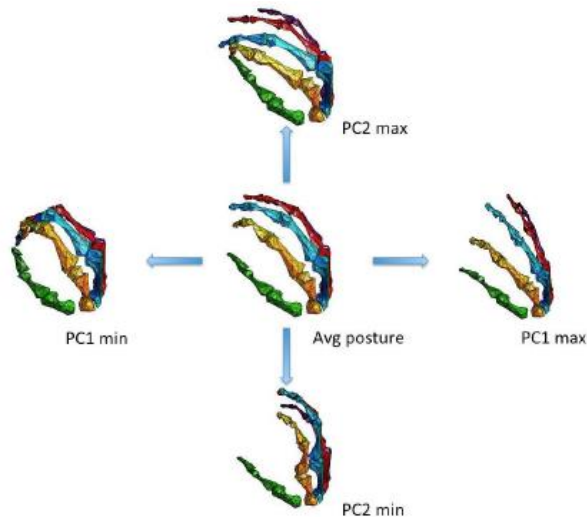


Ilustración 18: Sinergias posturales [6]

2.1.4.2 Taxonomías y clasificaciones

Respecto a las taxonomías, se hacen clasificaciones de los distintos agarres que hace un ser humano a la hora de coger y manipular objetos. Aunque no hay una clasificación perfecta que agrupe todos los agarres y manipulaciones que se pueden hacer, se pueden distinguir según el enfoque principal que se haga: mano-céntrico u objeto-céntrico.

Mientras que las objeto-céntricas se concentran en estudiar cuál es la forma óptima de agarrar o manipular una serie de objetos, las mano-céntricas se enfocan en analizar las distintas

posiciones que ha de adquirir el prototipo para que pueda ejercer cualquier clase de acción sobre un objeto.

De estas últimas, la más famosa es la Cutkosky [44] (véase Ilustración 19), aunque han surgido otras a lo largo del tiempo de las cuales en esta tesis se recomienda la taxonomía de Bullock [24] (Ilustración 20) y cuya taxonomía de clasificación distingue, además, manipulación en movimiento.

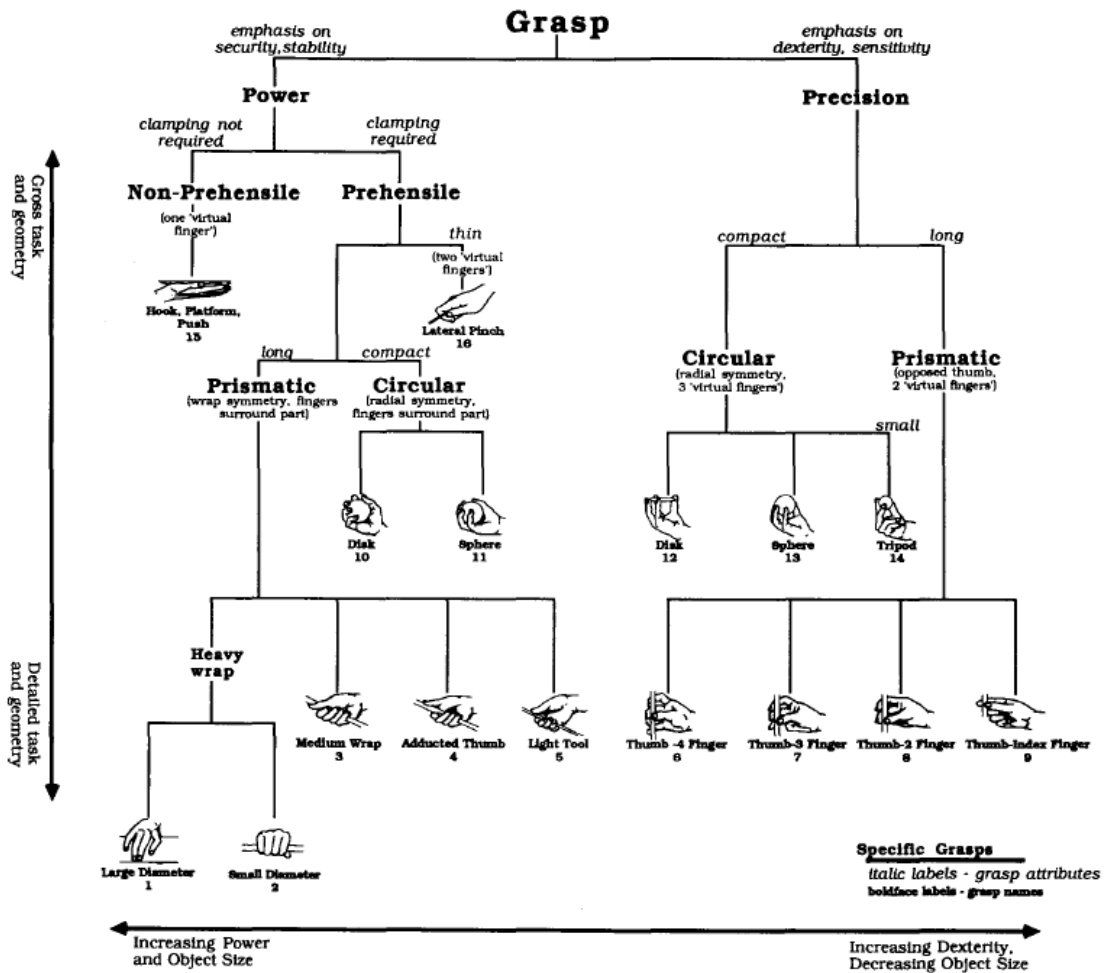


Ilustración 19: Taxonomía Cutkosky, [44]

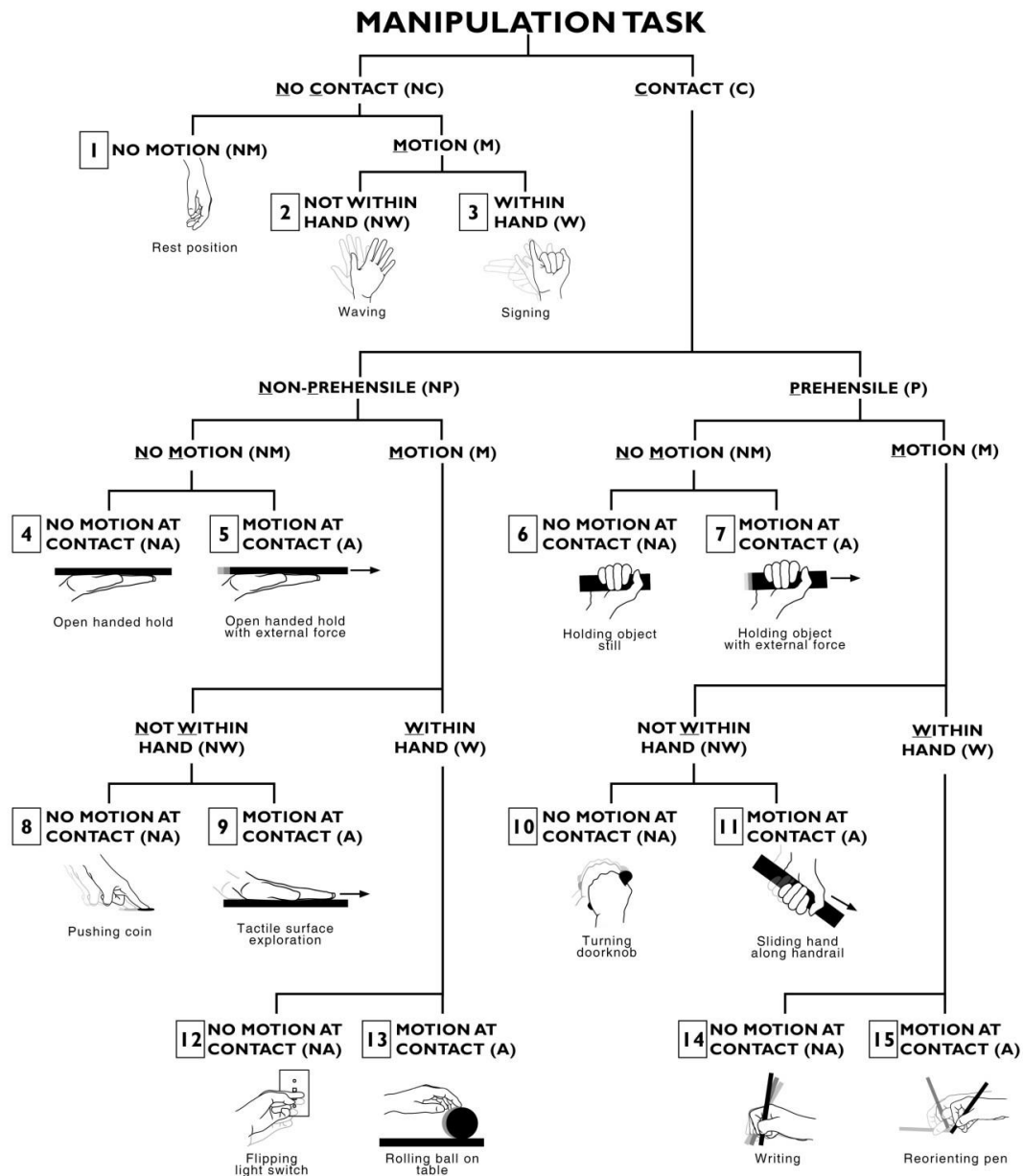


Ilustración 20: Taxonomía Bullock [24]

En esta última se defiende que toda tarea puede ser descompuesta en la consecución de una serie de tareas más simples de manipulación siendo, por ejemplo, *acercamiento para coger un objeto* la consecución de “NC M NW”.

Además, hace una clasificación de manipulación de una mano prensil (véase Ilustración 21).

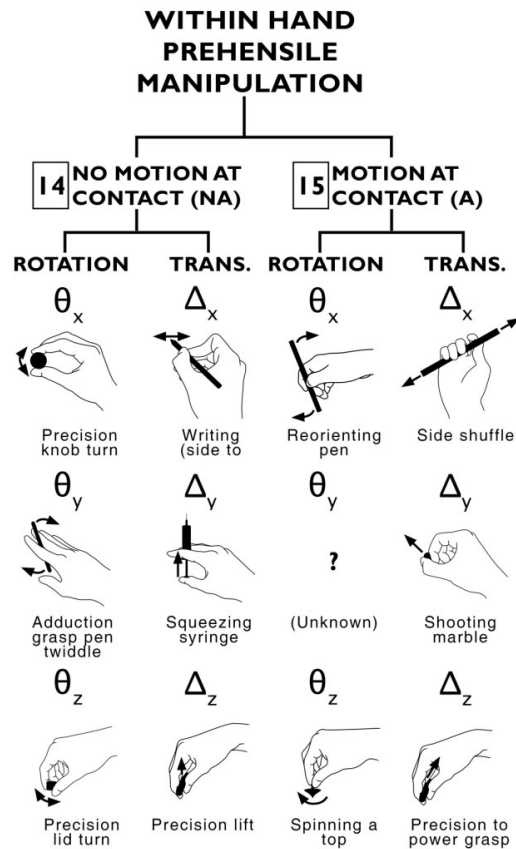


Ilustración 21: Taxonomía Bullock - Manipulación prensil en mano [24]

2.1.5 Tipología

Por último, se distinguen dos tipologías en las manos robóticas. Se han de diferenciar dos conceptos: grados de libertad y grados de actuación. En este trabajo vamos a entender grado de libertad como aquel donde hay un movimiento relativo entre dos sólidos rígidos. Por otro lado, un grado de actuación es cuando uno de esos grados libertad está completamente controlado por un único actuador. Esto es, que un actuador no controla varios grados de libertad.

Por tanto, en base a estas definiciones, podemos distinguir las dos tipologías: actuada y subactuada. Una mano actuada es aquella que tiene los mismos grados de actuación que de libertad; mientras que una mano subactuada es aquella que utiliza un actuador para mover varios grados de libertad. Esto último es común debido a un criterio del tamaño de los actuadores, y se suelen ligar los movimientos de las falanges proximal, media y distal a un solo actuador (mediante un sistema de cable polea, por ejemplo), haciendo que un actuador mueva tres grados de libertad.

2.1.5.1 Tipología subactuada

Es aquella que tiene más grados de libertad que grados de actuación. Este tipo de manos ha demostrado tener una gran capacidad de agarre y generalmente satisface todas las necesidades de tipo “pick and place”. Además, la tipología subactuada suele significar un coste menor respecto a la tipología actuada [26], ya que se reduce en gran medida el número de componentes.

En contraposición, son dispositivos que no se corresponden con la anatomía humana en el sentido de que, aunque en una mano humana sí hay movimientos subactuados (como la falange distal), no ocurre así en la mayoría de los grados de libertad. Por lo general [27, 28], se utiliza un

actuador para poder controlar a contracción y la abducción de un dedo, lo que convierte al prototipo en algo útil para el agarre de objetos, pero no para manipulación de estos dentro de la mano (manipulación en mano).

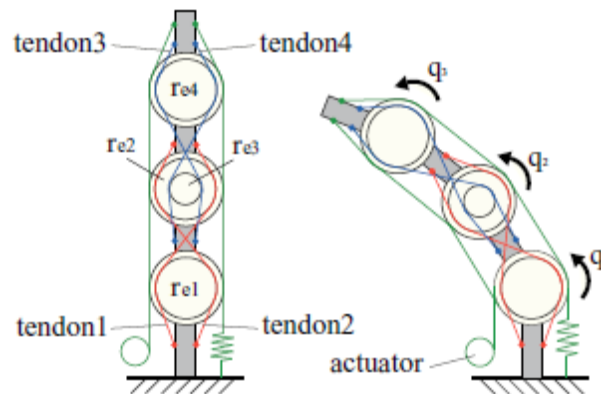


Ilustración 22: Ejemplo de un dedo de tipología subactuado [29]

2.1.5.2 Tipología actuada

La tipología actuada tiene las ventajas de tener un control más simple. Esto suele implicar que es la tipología más utilizada si se desea hacer un control donde haya una gran complejidad, como manipulación en mano. No tiene limitaciones en relación a las capacidades mecánicas de una mano real más que los límites físicos de los actuadores. Mecánicamente son más complejas y suelen ir ligada a un aumento del coste general del proyecto [20, 30, 31]. Tiene una mayor semejanza a la anatomía humana y es más adecuada para la manipulación en mano.

No obstante, el proyecto de KITECH [15], demostró que esto no tiene por qué ser así, y en este trabajo se seguirá esa línea. Uno de los requisitos del proyecto es que mantenga una relación entre las capacidades y anatomía humanas y, por tanto, se utilizará la tipología actuada para el desarrollo del prototipo.

2.2 Análisis Hardware

2.2.1 Actuadores

Para esta parte del trabajo se hace especial mención a [32], donde se hace un exhaustivo estudio de los distintos actuadores y mecanismos de transmisión para manos robóticas. En los dos siguientes epígrafes se hace una distinción y análisis de las diferentes soluciones que se pueden dar a la pregunta de cómo generar el movimiento y cómo transmitirlo al eje de actuación.

Respecto a los actuadores, se hace la siguiente distinción (ver Ilustración 23):

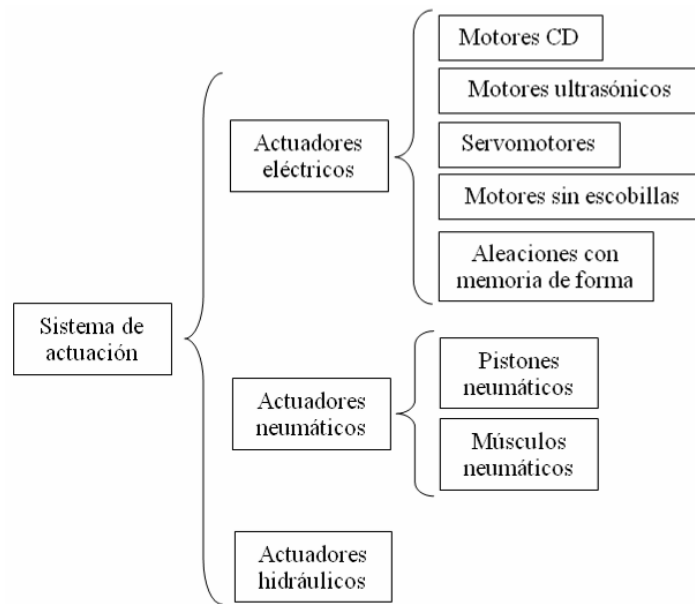


Ilustración 23: Actuadores posibles en manos robóticas, [32].

En [32] se presentan unas tablas comparativas (véase Tabla 2 y Tabla 3) de los actuadores donde se asigna un valor en una escala del 1 al 10 a serie de factores y relaciones tales como: Peso/Costo, Vida útil o Eficiencia. Por otro lado se muestra una tabla comparativa de transmisiones (véase Tabla 4) en la misma línea pero asignado notas del 1 al 5.

Tabla 2: Tabla comparativa actuadores I [32]

TIPO DE ACUADOR	Motor eléctrico	Motor a pasos	Motor ultrasónico	Servo con motor eléctrico convencional	Servo con motor sin núcleo	Servo con motor sin escobillas
Peso/Costo *	8	7	4	8	8	5
Torque/Costo *	9	8	5	9	10	6
Torque/Peso *	8	6	7	8	9	10
Disponibilidad en el mercado *	10	9	6	10	10	8
Confiabilidad *	8	9	7	10	10	10
Vida útil *	7	8	4	7	8	10
Flexibilidad y acoplamiento directo a otros sistemas mecánicos *	6	7	7	7	7	7
Cuidados y mantenimiento *	7	8	8	8	8	10
Ruido producido en relación al tamaño del actuador *	7	7	7	7	7	9
Eficiencia (%)	< 80	< 80	<50	< 80	< 90	< 95
Peso Mínimo	gr	dgr	gr	dgr	gr	gr
Tamaño mínimo	mm	cm	mm	cm	cm	cm
Temperatura de operación (°C)	-20 - 85	-20 - 85	-10 - 50	-20 - 85	-20 - 85	-20 - 85
Máxima temperatura alcanzada (°C)	125 (En rotor)	85 (En superficie)	55 (En superficie)	125 (En rotor)	125 (En el rotor)	75 (En superficie)
Precisión	-	Fracción de grado	Fracción de grado	Fracción de grado	Fracción de grado	Fracción de grado
Tipo de energía utilizada	CD/CA	CD/CA	CD/CA	CD/CA	CD/CA	CD/CA
Tipo de movimiento	Rotatorio	Rotatorio	Lineal/Rotatorio	Rotatorio	Rotatorio	Rotatorio
Actuación bidireccional	Si	Si	Si	Si	Si	Si
Requerimiento de aditamentos adicionales	No	No	No	No	No	No
Movimientos amortiguados	No	No	No	No	No	No

*La clasificación se hace de 1 a 10. 10 indica el mejor comportamiento.

Tabla 3: Tabla comparativa actuadores II [32]

Tipos de actuadores	Aleaciones con memoria de forma	Músculos neumáticos	Pistón eléctrico actuado por SMA	Pistón hidráulico (Solo el actuador)	Pistón neumático (Solo el actuador)
Peso/Costo *	10	7	9	6	7
Fuerza lograda/Peso *	8	9	6	10	8
Fuerza lograda/Costo *	7	9	6	10	8
Disponibilidad en el mercado *	6	4	6	10	10
Confiabilidad *	4	6	5	7	6
Vida útil *	4	7	4	7	7
Flexibilidad y acoplamiento directo a otros sistemas mecánicos *	9	8	9	8	8
Cuidados y mantenimiento *	6	6	6	8	8
Ruido producido en relación al tamaño del actuador *	10	8	9	8	8
Eficiencia (%)	<10	<40	<10	< 85	< 85
Peso Mínimo	dgr/m	dgr	gr.	dgr	dgr
Tamaño mínimo	Ø µm	Ø mm	cm	cm	cm
Temperatura de operación (°C)	-	0 - 50	-75 - 75	**	**
Máxima temperatura alcanzada (°C)	>500	-	-	**	**
Precisión	µm	mm	µm	mm	mm
Tipo de energía utilizada	CD/CA	-	CD/CA	-	-
Tipo de movimiento	Lineal	Lineal	Lineal	Lineal	Lineal
Actuación bidireccional	Si	No	No	Si	Si
Requerimiento de aditamentos adicionales	No	Si	No	Si	Si
Movimientos amortiguados	Si	Si	Si	Si	Si

*La clasificación se hace de 1 a 10. 10 indica el mejor comportamiento.

2.2.2 Transmisión

El sistema de movimiento ideal sería aquel que no necesitase sistema de transmisión. Sin embargo, por limitaciones tecnológicas, los actuadores normalmente son demasiado grandes para introducirlos dentro de los dedos sin dejar de cumplir los compromisos de tamaño y forma. Por ello, es necesario el uso de mecanismos de transmisión que trasladen la fuerza desde el actuador hasta el eje de giro. Aquí se distinguen once formas de transmitir la energía mecánica:

Tabla 4: Tabla comparativa transmisiones [32]

Dispositivo	Tamaño mínimo	Eficiencia máxima	Capacidad de transmisión de potencia*	Resistencia mecánica*	Precisión en los movimientos*	Facilidad de ensamble*	Componentes adicionales	Continuidad en el movimiento*	Mantenimiento*	Relación de transmisión máxima	Disponibilidad en el mercado*
Cadenas	mm	98%	5	5	4	3	No	3	2	10:1	5
Correas	mm	98%	3	3	4	4	No	3	4	15:1	5
Engranajes	mm	99%	5	5	5	2	No	5	3	100:1	5
Levas	---	---	5	5	5	4	Si	5	3	---	4
Tornillo sinfín	---	98%	5	5	5	3	No	5	3	360:1	4
Piñón-cremallera	---	---	5	5	5	4	No	5	4	---	5
Barras	---	---	5	5	5	4	No	3	5	---	---
Ruedas de fricción		---	2	2	3	5	No	3	4	---	4
Cables Bowden	μm	---	3	4	4	5	Si	4	4	---	5
Junta universal	mm	94%	5	5	3	4	Si	4	4	---	5
Cable-polea simple	mm	---	3	4	4	5	No	4	4	---	5

*La clasificación se hace de 1 a 5. 5 indica el mejor comportamiento.

2.2.3 Fuerza en la huella de la falange distal

Uno de los requisitos del proyecto es el de alcanzar una fuerza similar a la humana. En un pequeño experimento con un grupo de 8 personas, se les pidió que realizaran fuerza sobre un sensor de presión. El resultado fue que la media de todos rondaba los 15N de fuerza en la punta del dedo índice, luego ese será el objetivo a alcanzar. Este objetivo coincide con una de las políticas de diseño de [3].

2.2.4 Presupuesto

Otro de los requisitos es el de hacer un prototipo *de bajo coste*. Bajo coste es un concepto relativista puesto que una cosa es barata según con que se compare. Como referencia, podemos encontrar presupuestos en torno a los 100000€ para las respuestas profesionales como prótesis o manos avanzadas para investigación o el sector aeroespacial. A continuación se muestran algunos precios orientativos¹.

- Hand Arm System (2010, DLR) [31]: 70000 - 100000€
- Shadow Hand: 60000 - 185000€
- iLimb: 100000€
- KITECH: <10000€

En el caso de la KITECH Hand los autores la consideran low-cost por estar el presupuesto por debajo de los 10000 dólares (USD) [15].

2.2.5 Peso

Según [33], la mano humana representa el 0,7% del cuerpo. Luego para una persona de 80kg, el peso aproximado de la mano serían 595 gramos. El objetivo a alcanzar en este trabajo será ese peso.

2.2.6 Integración de los actuadores

En [4] se hace otro tipo de distinción: la integración de los actuadores. Estos pueden clasificarse en remotos o integrados. Remotos son aquellos en los que los actuadores se sitúan en otra zona

¹ Los precios son orientativos y se han sacado de la aplicación para iPad "Robots" en los tres primeros casos y de [15] para el cuarto.

que no sea la mano o la muñeca, mientras que los integrados son los que están en esa parte. Para este prototipo se considera requisito que los actuadores estén integrados en la palma.

2.3 Comparativa de manos robóticas

A continuación se presenta una tabla comparativa de las manos robóticas actuales. El estado del arte se obtiene principalmente de [4, 34] y se añaden algunas otras. Al igual que en [4], se hace distinción entre las categorías: actuación remota o integrada, y el número de dedos.

3 dedos, actuadores remotos

Nombre	Año	Grados de actuación	Grados de libertad	Imagen
Okada Hand	1977	11	11	

Ilustración 24: Okada Hand

Stanford/ JPL Hand	1983	9	12	
--------------------	------	---	----	---

Ilustración 25: Stanford/JPL Hand

4 dedos, actuadores remotos

Nombre	Año	Grados de actuación	Grados de libertad	Imagen
Utah/M.I.T. Hand[1]	1983	16	16	

Ilustración 26: Utah/M.I.T. Hand[1]

LMS Hand 1998 16 16

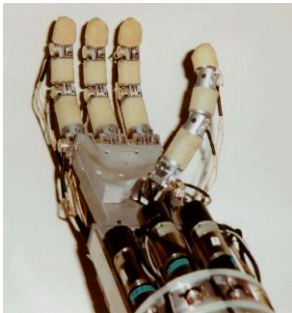


Ilustración 27: LMS Hand

5 dedos, actuadores remotos

Nombre	Año	Grados de actuación	Grados de libertad	Imagen
--------	-----	---------------------	--------------------	--------

Robonaut Hand [35] 1999 12 20

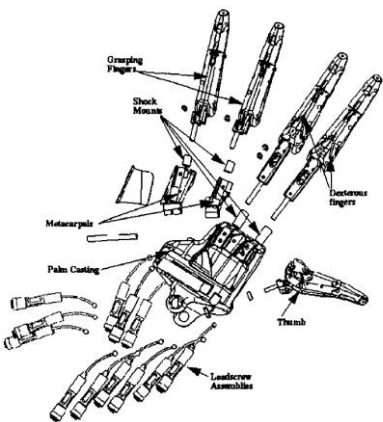


Ilustración 28: Robonaut Hand [35]

Robonaut Hand 2 [19, 23] 2010 12 20

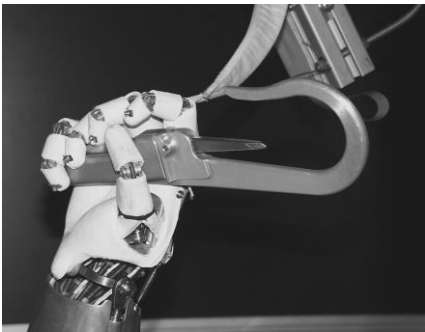


Ilustración 29: Robonaut 2 Hand [19, 23]

Shadow Hand [36] 2003 18 22



Ilustración 30: Shadow Hand [36]

ACT Hand [37] 2003 20 23

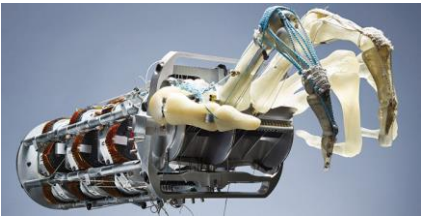


Ilustración 31: ACT Hand [37]

UB Hand III [21] 2004 15 20



Ilustración 32: UB Hand III [21]

UB Hand IV 2009 24 24

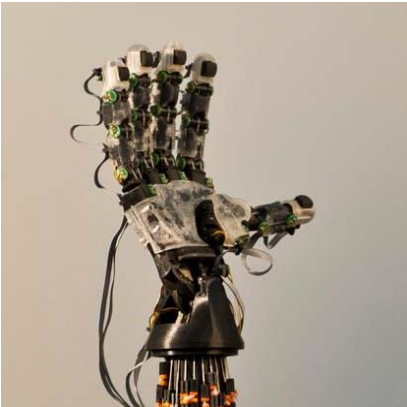


Ilustración 33: UB Hand IV

Cyberhand 2006 6 16

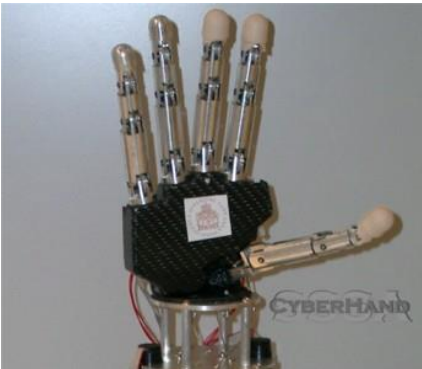


Ilustración 34: Cyberhand

Belgrade/USC Hand 1990 4 18

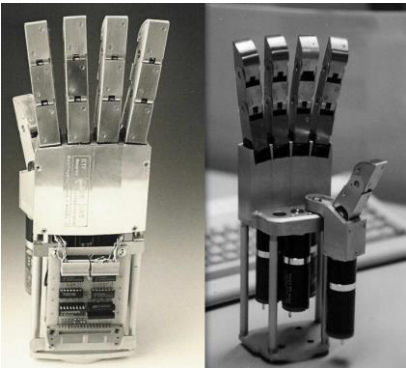


Ilustración 35: Belgrade/USC Hand

DIST Hand 1998 16 16

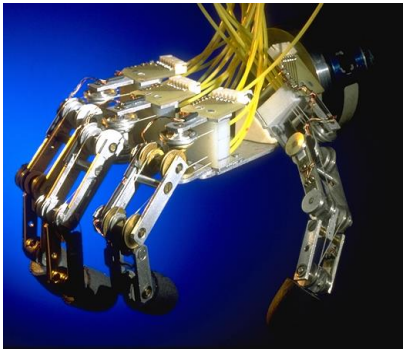


Ilustración 36: DIST Hand

Tokyo Hand 1999 12 16

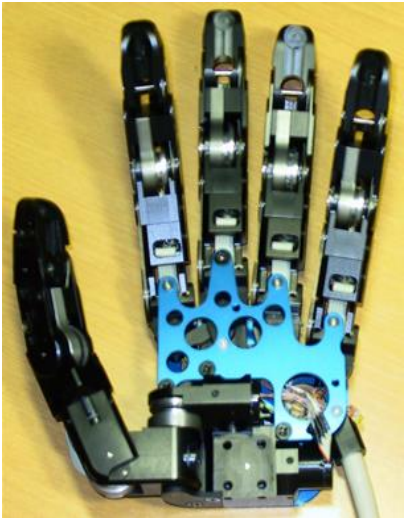




Ilustración 37: Tokyo Hand

EH1 Milano [17]	2010	6	16	
Ilustración 38: EH1 Hand [17]				

Hand Arm System [31]	2010	26	52	
Ilustración 39: Hand Arm System [31]				

3 dedos, actuadores integrados

Nombre	Año	Grados de actuación	Grados de libertad	Imagen
Barret Hand	1988	4	8	
Ilustración 40: Barret Hand				

.....

iGRIPP Hand [38]	2013	2	8
------------------	------	---	---

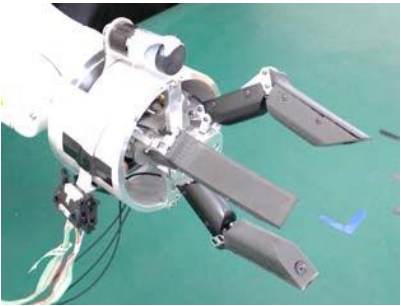


Ilustración 41: iGRIPP Hand [38]

.....

SARAH Hand [27]	2001	1	3
-----------------	------	---	---



Ilustración 42: SARAH Hand [27]

4 dedos, actuadores integrados

Nombre	Año	Grados de actuación	Grados de libertad	Imagen
--------	-----	---------------------	--------------------	--------

.....

DLR Hand I [39]	1998	12	16
-----------------	------	----	----



Ilustración 43: DLR Hand I

.....

.....

DLR Hand II [12] 2001 13 18

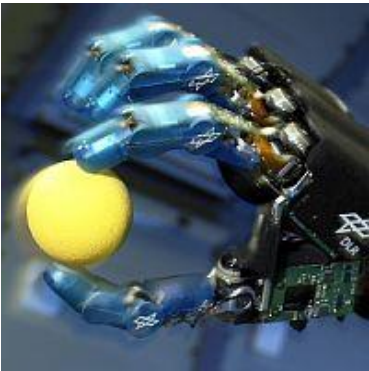


Ilustración 44: DLR Hand II [12]

.....

Twendy-One Hand [14] 2009 13 16

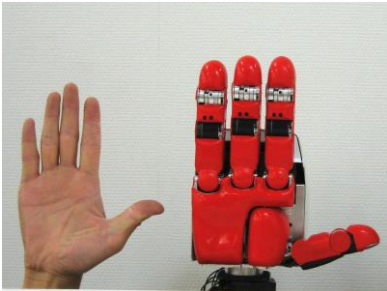


Ilustración 45: Twendy-One Hand

.....

MEKA Hand 2009 5 12



Ilustración 46: MEKA Hand

.....

Dexhand [10] 2011 12 12

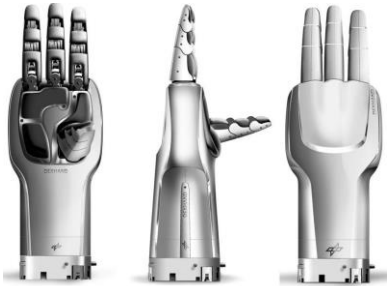


Ilustración 47: Dexhand [10]

.....

KITECH Hand [15]	2012	16	16
------------------	------	----	----

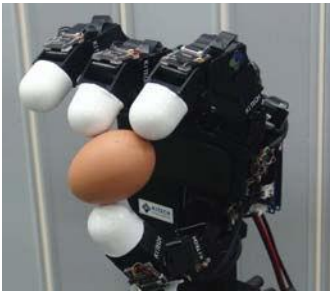


Ilustración 48: KITECH Hand [15]

5 dedos, actuadores integrados

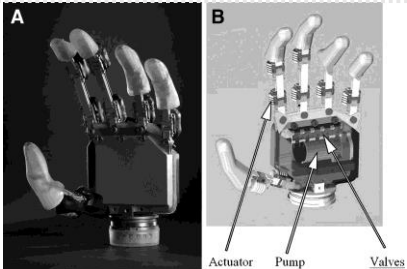
Nombre	Año	Grados de actuación	Grados de libertad	Imagen
Fluidhand III	2001	13	13	

Ilustración 49: Fluidhand III

Gifu Hand II [18]	2002	16	20
-------------------	------	----	----



Ilustración 50: Gifu Hand II [18]

Gifu Hand III [40]	2002	16	20
--------------------	------	----	----



Ilustración 51: Gifu Hand III [40]

I-Limb ultra	2008	5	11
--------------	------	---	----



Ilustración 52: i-Limb

ELU2 Hand [30] 2009 9 17

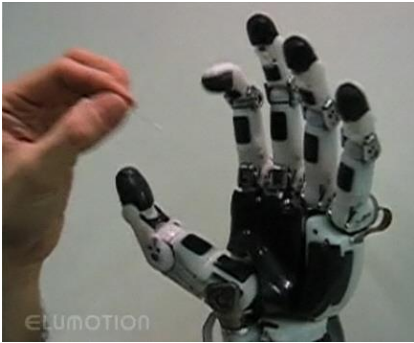


Ilustración 53: ELU2 Hand [30]

The UNIP Hand 2012 1 17



Ilustración 54: UNIP Hand

Ultralight Hand 2000 13 18



Ilustración 55: Ultralight Hand

GCUA Hand [41] 2009 6 15



Ilustración 56: GCUA Hand [41]

iCub Hand [28, 42]	2008	9	20
--------------------	------	---	----



Ilustración 57: iCub Hand [28, 42]

Ritsumeikan Hand [29]	2013	6	16
-----------------------	------	---	----

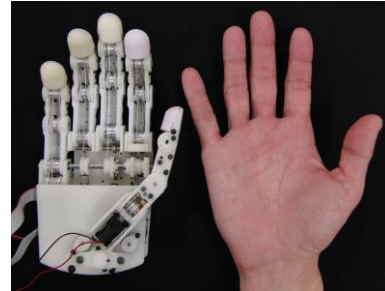


Ilustración 58: Ritsumeikan Hand [29]

Schunk Hand [20]	2013	9	20
------------------	------	---	----



Ilustración 59: Schunk Hand [20]

2.4 Programas informáticos

Para terminar con este bloque, se va a hacer una discusión de los programas de diseño CAD y análisis FEM que se pueden utilizar para el trabajo.

2.4.1 Diseño CAD

En este apartado se presentan las características de los tres programas CAD (Computer Aided Design) que el autor utiliza. Se descarta el uso de otros programas de los que no se tiene conocimiento por una cuestión de plazos del proyecto.

2.4.1.1 Solidworks

Solidworks es un programa de diseño principalmente orientado al ingeniero mecánico. Surge como respuesta a la complejidad de otros programas y destaca por su potencia y sencillez. En los últimos años ha ido abarcando más caras del diseño, ya no solo mecánico, si no eléctrico, tuberías y superficies.

Mientras que su principal ventaja es la facilidad de uso, también es una de sus desventajas, ya que en ocasiones faltan opciones de configuración que otros programas CAD sí se te ofrecen. No obstante es bastante completo en todos los aspectos del diseño mecánico de la mano robótica exceptuando el complejo control de la forma y la ausencia de un módulo para diseño con subdivisiones.

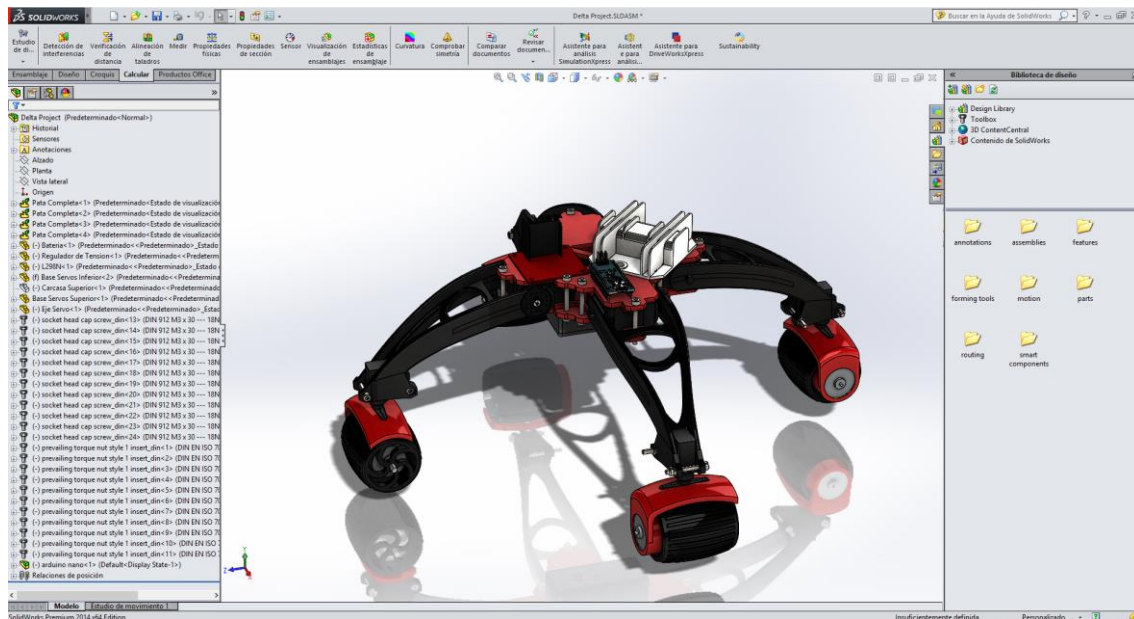


Ilustración 60: Interfaz de Solidworks 2014

2.4.1.2 Rhinoceros V5

Rhinoceros ha cogido fuerza en la escena del diseño debido a su alta modularidad y a su enfoque principal en los diseñadores. Hace una gran hincapié en las posibilidades del diseñador y tiene múltiples herramientas tanto para diseño 2D, 3D, subdivisiones o polígonos y todo ello dentro de una interfaz limpia y sencilla.

Como contra, no está enfocado en el diseño mecánico y por tanto carece de herramientas de FEM o de guiado de cables, por ejemplo, integradas. Puede ser una buena solución para el diseño de la forma exterior.

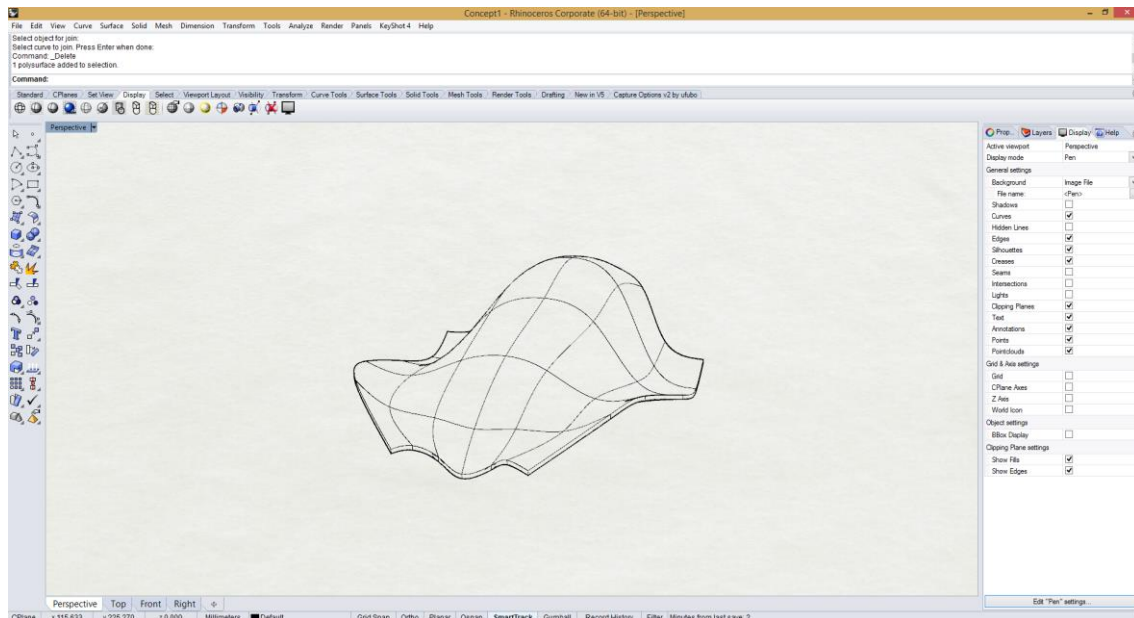


Ilustración 61: Interfaz de Rhinoceros V5

2.4.1.3 Catia V5

Catia es líder mundial en su franja de mercado como suite de programas orientados a las distintas necesidades de la empresa. Catia ofrece una solución completa a todo el ciclo de vida del

producto, desde el diseño, pasando por mantenimiento hasta su fin. Es altamente modular, basándose en una estructura base de la que dependen distintos módulos.

En Catia se encuentran todas las herramientas necesarias para el diseño del prototipo incluido el modulo Imagine & Shape para el diseño y el control absoluto de la forma exterior. Por contra, es un programa bastante complejo y lleno de opciones que pueden alargar los plazos de diseño respecto a los anteriores mencionados.

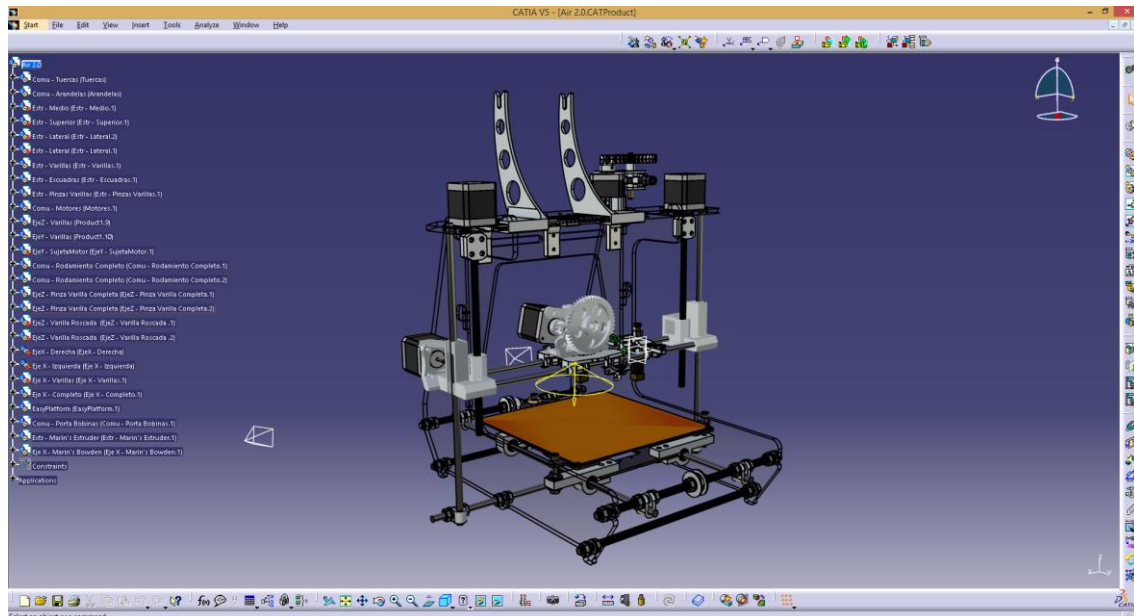


Ilustración 62: Interfaz de Catia V5

2.4.1.4 Elección de programa CAD

Finalmente se opta por usar Catia V5 por tener el mejor abanico de herramientas y por la experiencia ya obtenida del autor. Aunque en un principio se diseñará un prototipo formado por formas casi primitivas, en una futura revisión se utilizará el modulo que permite diseñar con subdivisiones para conseguir formas más orgánicas.

2.4.2 Análisis FEM

Los programas de elementos finitos permiten, mediante herramientas matemáticas calculadas por ordenador, dar respuesta a deformaciones que tienen diferentes materiales debido a fuerzas externas. En este caso solo se harán análisis estructurales estáticos para estudiar las deformaciones que tendrán algunas partes de la mano ante unas fuerzas supuestas.

Al igual que en 2.4.1, se discuten dos programas debido a la experiencia de uso previa del autor.

2.4.2.1 Ansys

Ansys es la mayor suite de software de análisis del mercado. Es usado por empresas de todo el mundo por su flexibilidad y su fiabilidad. Se divide en módulos que abarcan desde la simulación de ondas electromagnéticas, pasando por análisis de fluidos o, lo que en nuestro caso utilizaríamos, análisis estático estructural. Sus principales ventajas son su modularidad y su potencia de cálculo, de cara a futuros estudios.

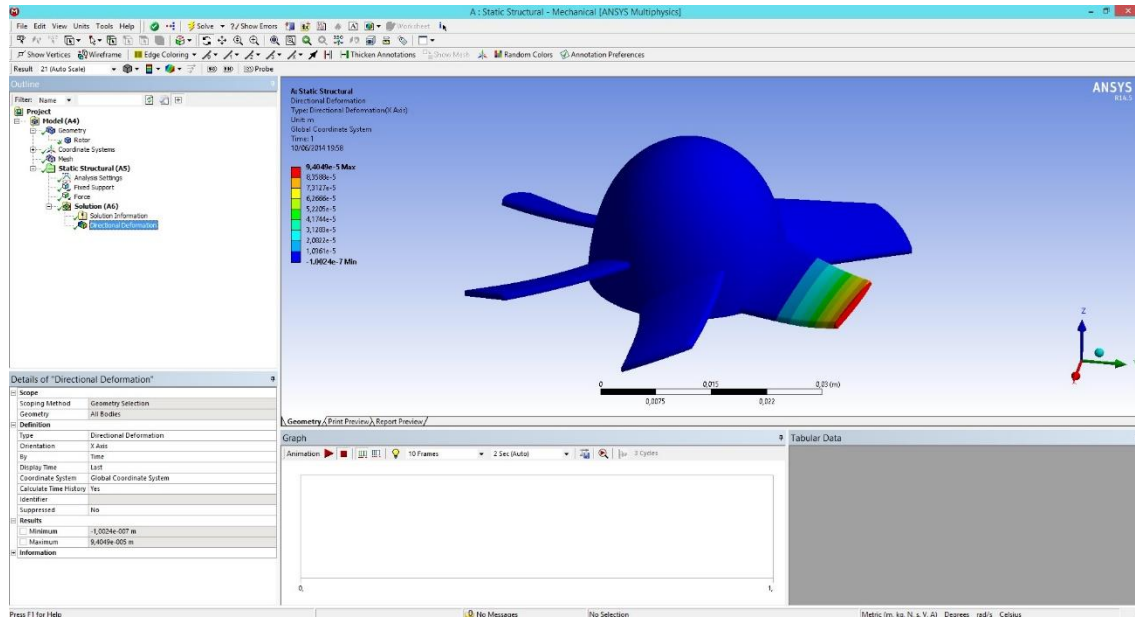


Ilustración 63: Interfaz Ansys Mechanical

2.4.2.2 Módulo Generative Structural Analysis de CATIA

Dentro de la plataforma CATIA, se cubre la parte del estudio estructural de un cuerpo con este módulo. Sin duda, la ventaja principal de usar este software FEM sería la integración dentro del mismo programa ahorrando así tiempo de ingeniería y errores que se pueden cometer en el proceso de traducción de formato Catia a un formato que entienda Ansys.

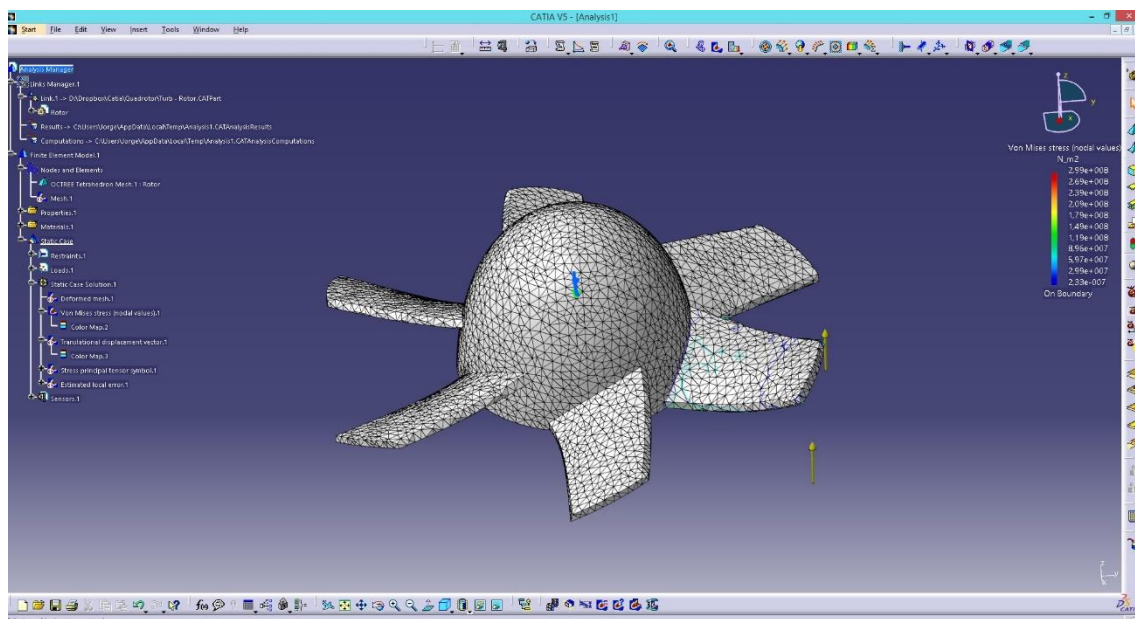


Ilustración 64: Interfaz Generative Structural Analysis de Catia

2.4.2.3 Elección del programa FEM

Debido a la gran modularidad, el software elegido es Ansys. Aunque en este trabajo solo se realizarán análisis estructurales estáticos, se abre la puerta así a que en un futuro se realicen otro tipo de análisis mecánicos como choques o vibraciones.

3. Ciclo de diseño

3.1 Metodología de diseño

La metodología de diseño va a consistir en:

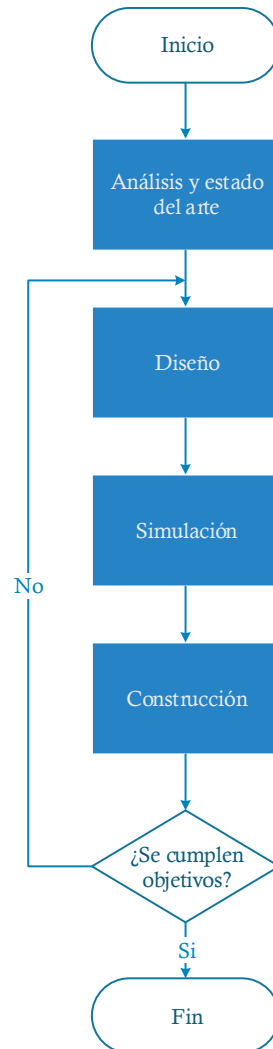


Ilustración 65: Metodología de diseño

De modo que el trabajo en esencia se dividirá en 4 bloques:

1. **Análisis:** Este primer bloque se refiere a todo el apartado 2, donde se ha hecho un estudio de todas las partes en las que se puede dividir el diseño y la implementación de una mano robótica. Desde la forma, los actuadores o el peso, son características que se van a tener en cuenta a la hora del diseño.
2. **Diseño:** En base a los objetivos y al previo análisis del estado del arte y características, se hace el diseño del prototipo. En esta parte se tratará de explicar el diseño de cada una de las partes del dibujo CAD, además de las simulaciones por elementos finitos (FEM).
3. **Simulación:** Se estudiarán las capacidades de la mano robótica enmarcando su habilidad en su habilidad para coger y manipular diferentes objetos escogidos por el autor.

4. **Construcción:** El último bloque tratará los objetivos alcanzados del diseño CAD así como problemas, sugerencias y mejoras que surgen a la hora de la fabricación y el montaje del prototipo.

Esta metodología iterativa de diseño es eficaz aunque tradicionalmente suele ser costoso y lento. El tiempo que transcurre desde la fabricación hasta la nueva iteración en diseño, se ve ampliamente reducido gracias a las nuevas tecnologías de fabricación aditivas de bajo coste ahora conocidas comúnmente como “impresoras 3D de bajo coste”. El uso de esta tecnología para el desarrollo de los prototipos permitirá reducir en tiempo y coste el cómputo global del proyecto.

A continuación se presentan los dos prototipos diseñados e implementados. Ambos modelos fueron consecutivos en el tiempo y, con todo lo aprendido del primer prototipo, se diseñó el segundo.

3.2 Prototipo 1

3.2.1 Componentes y características del prototipo

Para este primer prototipo y en base a 2.2.1 y 2.2.2, se deciden usar servomotores (servos) debido a su reducido peso y tamaño, su capacidad para ser controlados fácilmente con cualquier micro y su coste asequible.

De la búsqueda de servomotores que se hizo al final se optó por usar los TowerPro MG-90 ya que estos ofrecen un par ($2,6\text{kg}\cdot\text{cm}$) que podría ofrecer los 15N de fuerza en la punta de los dedos que se buscan. Esto, junto con las reducidas medidas exteriores y su asequible precio ($\sim 4\text{€}$), les hace la opción más equilibrada para la primera versión del prototipo.

Para el control de estos servomotores se usará un Arduino UNO, ya que el autor tiene una dilatada experiencia con esta plataforma y además existe multitud de soporte por internet. También existen interfaces CAN Bus para poder establecer una conexión entre el humanoide TEO y la mano.

Además, se opta por el uso de correas para la transmisión del movimiento. Se comienza usando unas correas de perfil T y de paso 2.5 abiertas, que luego serán cerradas. Las poleas de esta correa se compran como un estándar y posteriormente se modifican para adaptarlas a nuestro prototipo.

Para el uso de cojinetes se recurrirá a la empresa Igus y para los ejes se utilizarán ejes de latón de diferentes diámetros que pueden ser cortados y torneados a la medida deseada.

En la Tabla 5 se resumen las características conseguidas con el primer prototipo:

Tabla 5: Tabla de características prototipo 1.0

Característica	Valor
Número de dedos	4
Numero de grados de libertad	8
Numero de grados de actuación	8
Actuadores	Servos TowerPro MG90
Transmisión	Correas T2.5 y poleas

<i>Cojinetes</i>	Igus GFM-0405-03
<i>Material</i>	PLA
<i>Proceso de fabricación</i>	Impresora 3D Low-Cost
<i>Electrónica</i>	Arduino UNO
<i>Control</i>	Control de posición mediante puerto serie
<i>Tamaño</i>	1:1

Para el diseño final de este prototipo se llevaron a cabo dos revisiones. Ambas revisiones (3.2.2, 3.2.3) son presentadas a continuación.

3.2.2 Revisión 1: Conceptualización

El diseño del prototipo comienza con una prueba de concepto para los actuadores, tamaño y forma de los requisitos del diseño. Una vez se haga una prueba de concepto y disposición de los servos, se podrá hacer elección del sistema de transmisión así como la posición de las uniones interfalángicas. Además se asumen las siguientes simplificaciones respecto a una mano real:

- Unión falanges distal y media
- Ausencia de grados de libertad en los MCPb's (ver Ilustración 5)
- Todos los dedos son iguales

A efectos prácticos se quiere conseguir una mano completamente actuada con 10 grados de libertad y actuación, consiguiendo mover las falanges distales y media, por un lado, y la proximal por otro. Todo ello en cada uno de los cinco dedos y de manera independiente.

3.2.2.1 Servomotor

El primer paso es hacer un modelado realista del servomotor escogido. Para ello, se tomaron medidas con un calibre digital y se reconstruyó el diseño del servo en el programa CAD (ver Ilustración 66).

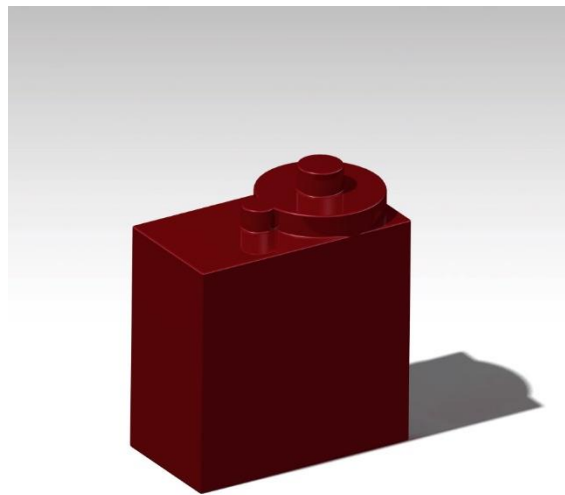


Ilustración 66: Dibujo 3D del servomotor

3.2.2.2 Palma preliminar

Una vez obtenido el modelo realista se procede a dibujar una palma concepto. Esto es, que para poder hacer una disposición de los servos, se ha de tener una plataforma sobre la que trabajar.

Para ello, se parte de una foto de una mano real (ver Ilustración 67) y se hace un boceto conservando las medias, en base a un objeto de referencia: un cubo de 20x20 mm situado en el plano superior derecho de la imagen.



Ilustración 67: Mano fotografiada

El resultado preliminar de la palma fue lo que se puede ver en la Ilustración 68.

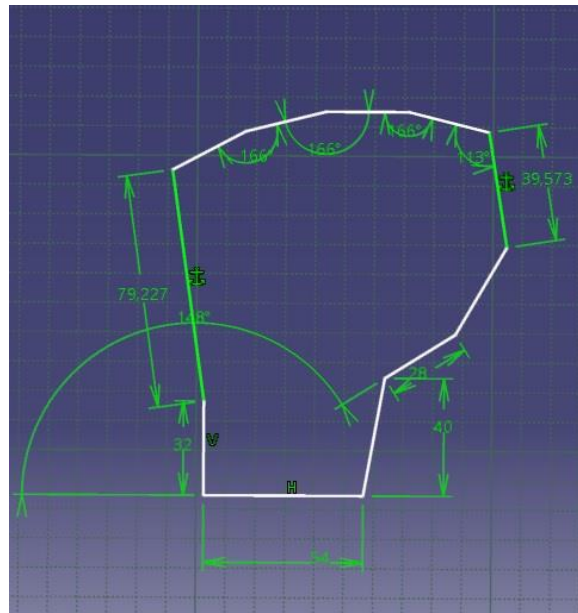


Ilustración 68: Dibujo palma preliminar

Una vez terminado el diseño, se comprueba que todos los servomotores pueden ser alojados dentro de la palma cumpliendo la política de diseño de la integración de los actuadores dentro de la mano.

3.2.2.3 Dedos preliminares y simplificación interfalángicas

Partiendo de las medidas que se pueden deducir de la Ilustración 67, se hace un diseño de los dedos. En esta revisión se decide hacer una simplificación haciendo una sola pieza de las falanges media y distal. Además solo se tendrán grados de libertad en los MCPa y en las PIP (ver Ilustración 5).

Para conseguir la PIP se opta hacer unos salientes en los que irán alojados los cojinetes. Se deciden hacer por el exterior del dedo por una razón de espacio. Al hacerlas hacia fuera queda más espacio en el interior a pesar de sacrificar la forma. Los cojinetes escogidos son unos igus GFM-0405-03 (ver Tabla 8), debido a su buen compromiso entre calidad, precio, fiabilidad y disposición. Se intenta mantener las medidas de la Ilustración 68 y el resultado se puede ver en la Ilustración 69.

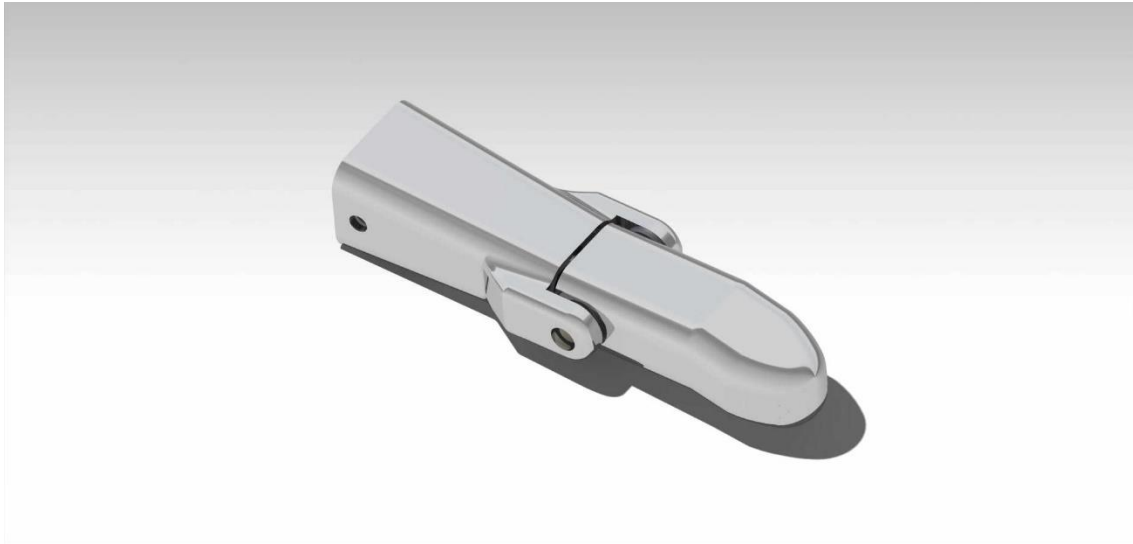


Ilustración 69: Dedo completo preliminar

3.2.2.4 Palma y cuna de los servos

Por último se diseña la palma inferior, lugar donde se sitúan los actuadores. Antes de llegar a hacer las cunas donde irían alojados los servos, se observa que los servos exceden el ancho máximo de los criterios antropomórficos marcados como requisitos tal y como se observa en la Ilustración 70.

Esto hace replantearse lo discutido en 2.1.2.1, y se decide hacer un nuevo diseño conservando el diseño de los dedos de este primer diseño de concepto y hacer una nueva palma con solo 4 dedos para poder así conservar las medidas antropomórficas propuestas. En Ilustración 71 se puede ver el diseño completo de la mano.

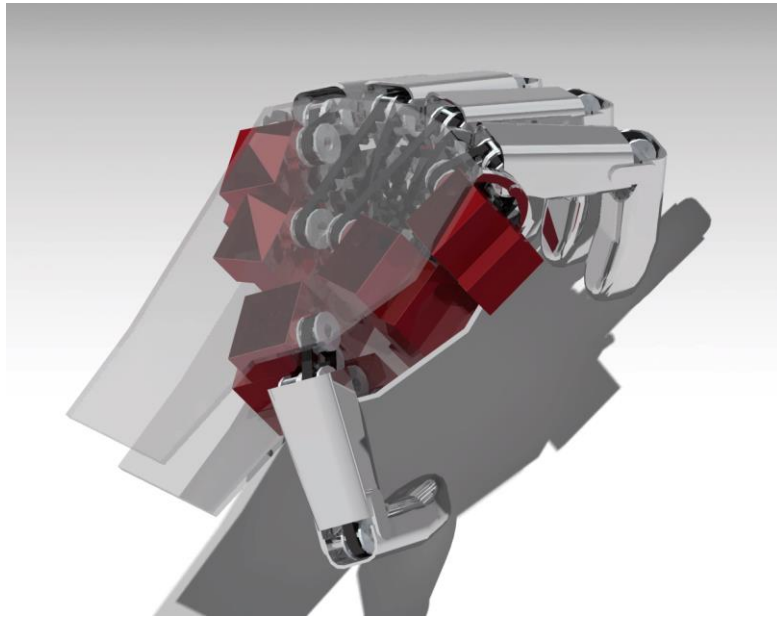


Ilustración 70: Prototipo 1.0 - Diseño conceptual 1



Ilustración 71: Prototipo 1.0 - Diseño conceptual 2

3.2.3 Revisión 2: Diseño orientado a la fabricación

Por tanto, en esta nueva revisión el diseño se centrará en dos puntos:

1. Orientarlo a la fabricación.
2. Tendrá 4 dedos (3 más pulgar) para cumplir con los criterios antropomórficos.

La reducción del número de dedos, como se comenta en 3.2.2.4, se debe a que el espacio necesario para alojar los servos de un quinto dedo alteraría la forma exterior hasta el punto en que excedería demasiado el requisito de conservar una forma antropomórfica.

3.2.3.1 Dedos definitivos

Partiendo del diseño anterior, se ensanchan ligeramente las paredes y se refuerzan los alojamientos de los cojinetes de la falange distal para hacerlo más resistente y fácil de fabricar. Se diseñan para permitir el giro de 0 a 90 grados, de modo que se hacen los cortes necesarios y se modela el dedo de modo que se permite el giro a 90 grados tanto en la falange proximal como en la distal.

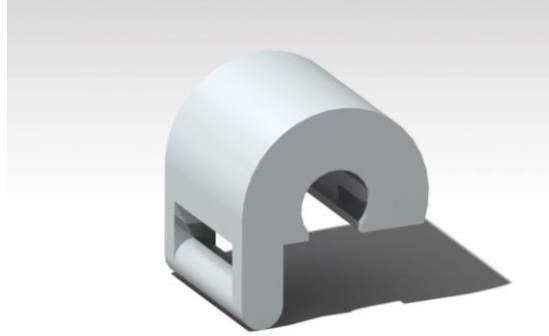


Ilustración 72: Guía de la correa

Por último se diseña, para cada dedo, el punto exacto donde irán las poleas así como una pieza que hace de guía (ver Ilustración 72) y tensor entre el servomotor de la falange distal y esta misma. Es necesario hacer una pieza adicional que mantenga la tensión en el caso de que la falange proximal este a 0º y a 90º, permitiendo el giro de la distal en cualquier caso como se muestra en Ilustración 73.

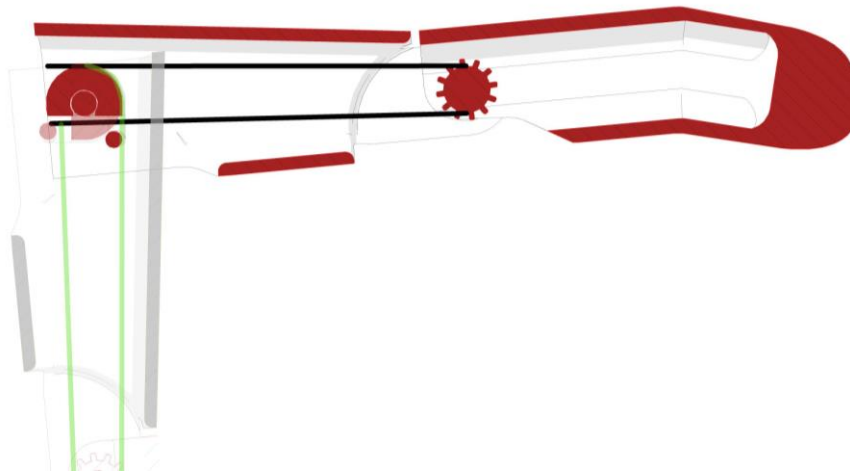


Ilustración 73: Demostración de uso de la guía de la correa

3.2.3.2 Palma definitiva

La palma ahora se diseña para alojar 4 servos. La separación angular de los dedos se elige de manera experimental viendo cual era ángulo óptimo que respondía mejor ante el compromiso de antropomorfismo, agarre de objetos y que no permitía el choque entre los dedos. Como se iba a fabricar con una impresora 3D de bajo coste, la palma es completamente plana.

Las cunas de los servos se diseñan de modo que estos encajen uno encima de otro para ser posteriormente pegados. Por supuesto, se modela la palma de modo que las correas puedan ser

alojadas y montadas. El resultado final de la palma, y de la mano completa del prototipo 1.0 es el siguiente:



Ilustración 74: Diseño final prototipo 1.0 - Vista inferior

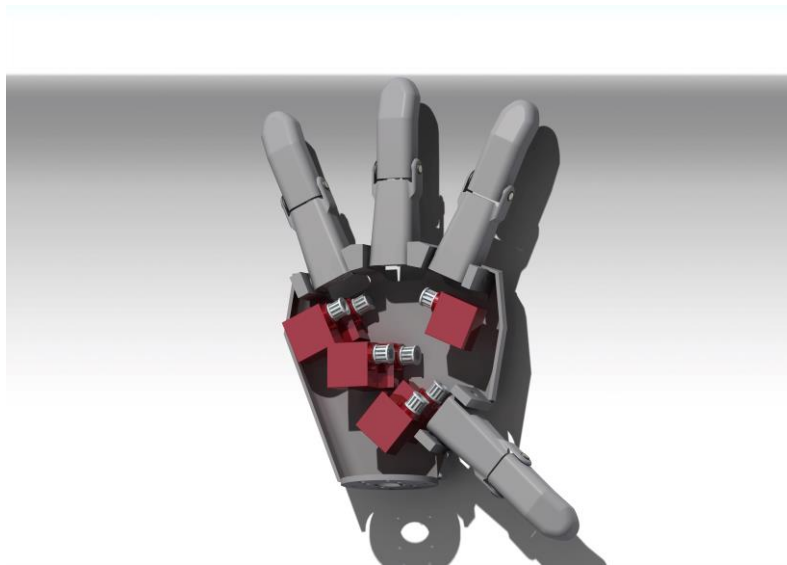


Ilustración 75: Diseño final prototipo 1.0 - Vista superior

3.2.4 Simulación

Para medir la capacidad de la mano, antes de ser fabricada se pusieron como objetivos que fuese capaz de coger y manipular una serie de objetos. Los objetos que se eligieron fueron:

- Un bolígrafo
- Una botella
- Una pelota de tenis
- Un portatizas
- Un rotulador gordo

A continuación se muestran las imágenes de estos objetos con el agarre de la mano:

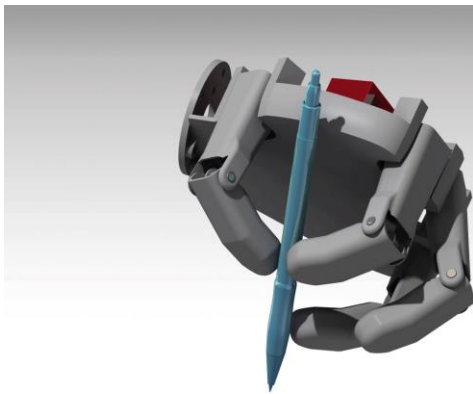


Ilustración 76: Prototipo 1.0 - Agarre bolígrafo 1

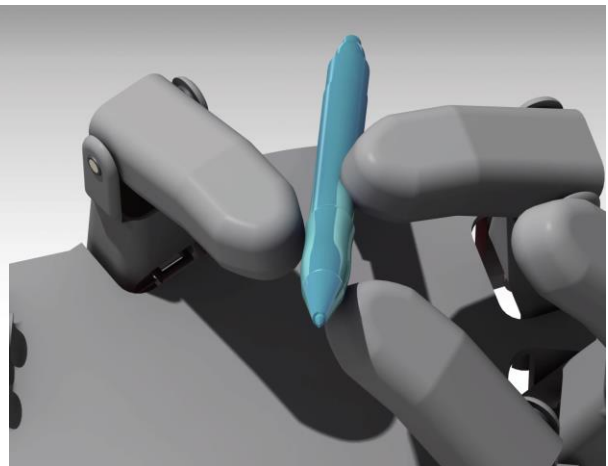


Ilustración 77: Prototipo 1.0 - Agarre bolígrafo 2



Ilustración 78: Prototipo 1.0 - Agarre botella 1

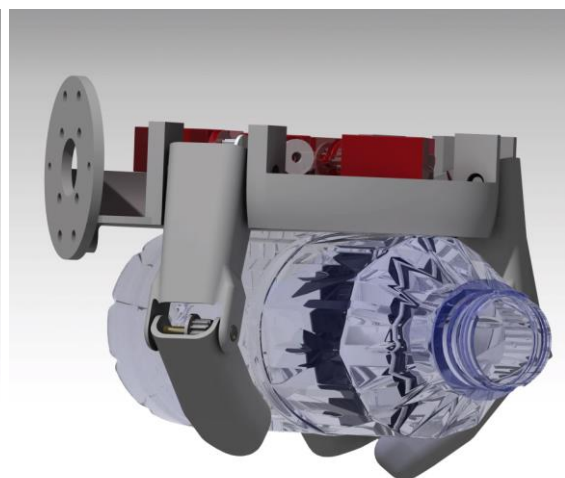


Ilustración 79: Prototipo 1.0 - Agarre botella 2

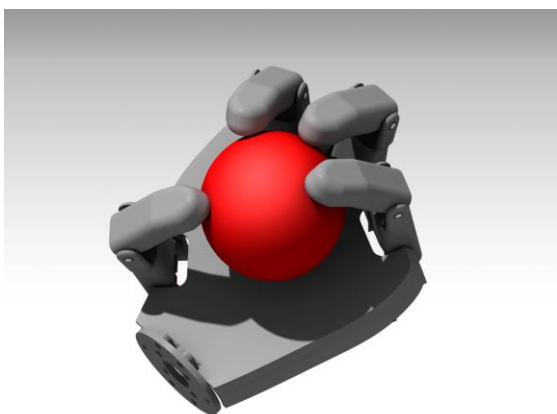


Ilustración 80: Prototipo 1.0 - Agarre pelota 1

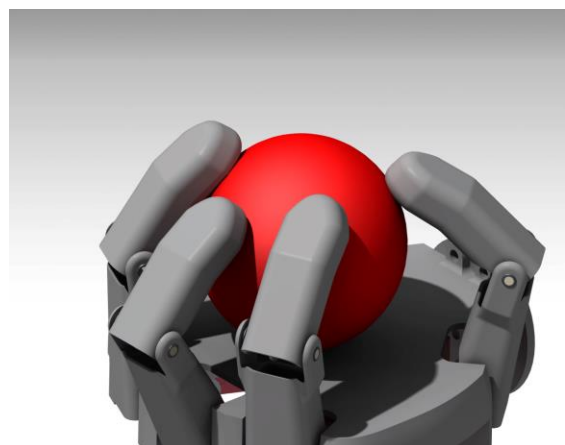


Ilustración 81: Prototipo 1.0 - Agarre pelota 2

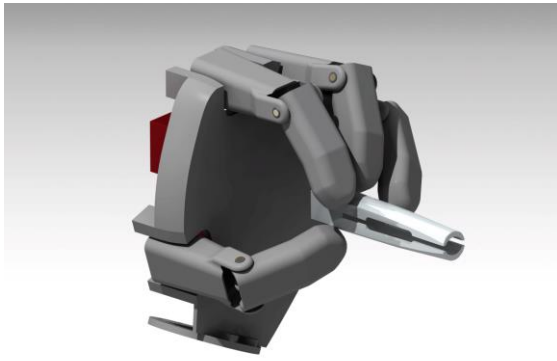


Ilustración 82: Prototipo 1.0 - Agarre portatizas 1



Ilustración 83: Prototipo 1.0 - Agarre portatizas 2



Ilustración 84: Prototipo 1.0 - Agarre rotulador 1



Ilustración 85: Prototipo 1.0 - Agarre rotulador 2

3.2.5 Fabricación y puesta en marcha

Una vez terminado el diseño preliminar, a falta de ajustar algunos detalles y tolerancias, empezó el proceso de fabricación. El método elegido, ciñéndose al objetivo de reducción de presupuesto, fue fabricarlo con una impresora 3D de bajo coste.

La impresora utilizada fue una Air 2.0 del ingeniero Manuel palacios², con un J-head de 0.5mm de boquilla. El material empleado fue PLA azul brillante.

² <https://plus.google.com/+ManuelPalacios/>

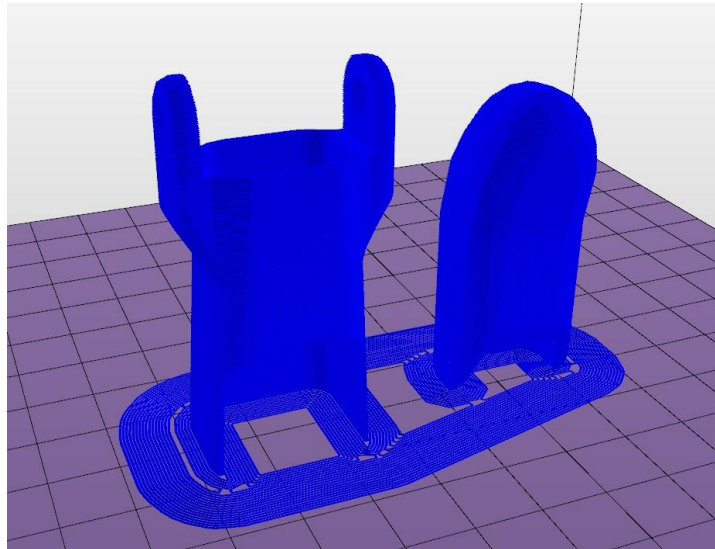


Ilustración 86: Simulación del gcode de las falanges proximal y distal

Se decidió fabricar primero un dedo para comprobar su fabricabilidad y validar su diseño. Tras diversas iteraciones modificando parámetros que hacían el diseño hacían más orientado a la fabricación y ajustando las tolerancias, el prototipo final del dedo alcanzado fue el siguiente:

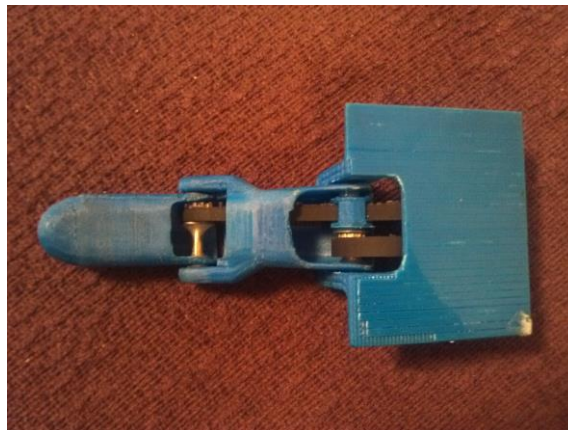


Ilustración 87: Prototipo 1.0 - Prueba de un dedo robótico

Se diseñó una plataforma especial que emulaba los ejes de la falange proximal. Una vez comprobado que el sistema de actuación y transmisión funcionaba, se pasó a la fabricación de la palma.

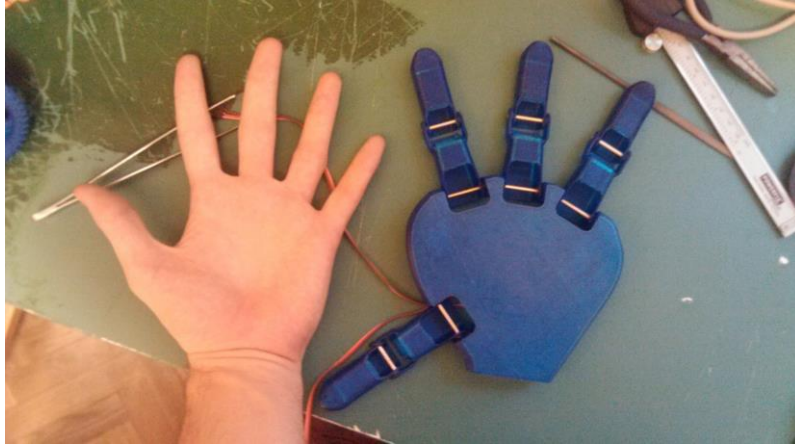


Ilustración 88: Fabricación prototipo 1.0 1

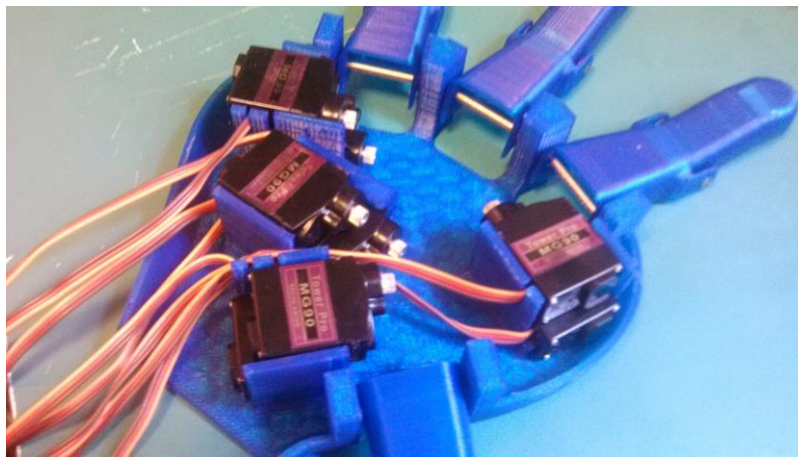


Ilustración 89: Fabricación prototipo 1.0 2

Finalmente, se modeló una interfaz para poder poner el prototipo 1.0 en el humanoide TEO de la Universidad Carlos III de Madrid. El resultado fue el siguiente:

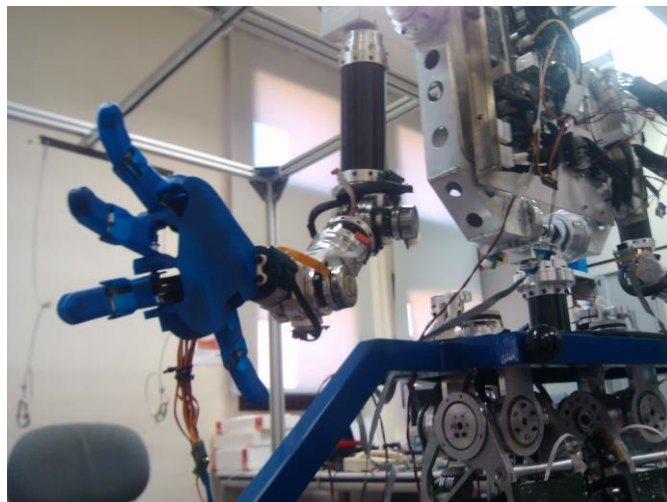


Ilustración 90: Prototipo 1.0 en el humanoide TEO

3.2.6 Análisis de resultados

Del modelado de las diferentes versiones y de la fabricación de las mismas se pudo validar que:

- Se puede crear una mano robótica actuada de bajo coste mediante servos y con estos integrados dentro de la palma.
- Además, se conservan proporciones antropomórficas, aunque tiene cuatro dedos.
- Es fabricable con las actuales impresoras 3D de bajo coste.

No obstante, aunque el prototipo de un dedo fue funcional, no se consiguió hacer igual de la mano entera. El motivo principal fue solo uno: la tensión de las correas. El montaje de las correas fue complicado y tedioso. No existían con exactamente los dientes y tamaños que se necesitaban para este prototipo, así que se optó por usar correas abiertas que posteriormente eran cerradas.

La mejor forma de cerrar la correa que se encontró fue la de pegar los extremos. No obstante, el único pegamento que agarraba y resistía los esfuerzos mecánicos, necesitaba 24 horas de curado y, lo que en la realidad pasaba, era que en ese tiempo se perdía la tensión dada a la hora de poner el pegamento.

Finalmente se concluye que el objetivo de todo el proyecto, el diseño y la implementación de una mano robótica actuada de bajo coste, es alcanzable pero que el mecanismo de transmisión elegido para este prototipo no es el adecuado.

3.3 Prototipo 2

Después de los resultados obtenidos del primer prototipo se opta por hacer un nuevo diseño. Este nuevo prototipo va a tener un enfoque más centrado en la forma exterior y en el diseño orientado a la fabricación y montaje. Las características principales serán:

- Nuevo diseño exterior mediante subdivisiones.
- Integración del actuador de la falange distal en la falange proximal.
- Sistema de huellas intercambiables de cambio rápido.

3.3.1 Componentes y características del prototipo

Los actuadores que se van a utilizar son los mismos que en el prototipo 2.0. Esto es así porque dieron buenos resultados en el primero uso y demostraron tener la fuerza y respuesta esperadas. Además también se continúa con el uso de los casquillos Igus que satisficieron las necesidades de baja fricción.

En este caso, el mecanismo de transmisión serán engranajes. Serán engranajes cónicos debido a que es necesario cambiar el sentido del giro 90 grados. Esto tiene dos ventajas: la primera que desaparece el problema que se tenía de la tensión y montaje de las correas del prototipo 1.0; y la segunda, es que es un sistema de transmisión más eficiente y con mejores características mecánicas que las correas.

Tanto el eje como los engranajes han de ir integrados en el diseño de modo que se reducirá el número de componentes y su consiguiente mejora en el mantenimiento y el montaje.

Por último, una de las ideas principales de este prototipo es que tenga los actuadores integrados. Debido a que las medidas y forma exterior del servo contradicen la política de diseño antropomórfica, se sacarán los componentes de uno de uno de los servomotores y se remontarán dentro de la falange en una cuna diseñada especialmente para este actuador.

La electrónica utilizada será el mismo Arduino UNO del prototipo anterior, aunque este diseño va a tener en cuenta el espacio requerido para integrar un Arduino nano dentro de la palma.

Las características del prototipo son:

Tabla 6: Tabla de características prototipo 2.0

Característica	Valor
Número de dedos	4
Numero de grados de libertad	8
Numero de grados de actuación	8
Actuadores	Servos TowerPro MG90
Transmisión	Engranajes cónicos 1:1
Cojinetes	Igus GFM-0304
Material	PA2200
Proceso de fabricación	Sinterización Laser Selectiva (SLS)
Electrónica	Arduino UNO
Control	Control de posición mediante serie
Tamaño	1:1

3.3.2 Revisión 3: Diseño orgánico e integración de servos

Este bloque de diseño se va a estructurar en siete apartados. Primero se trata la integración de un servo dentro de la falange (3.3.2.1), para continuar con una explicación del diseño de los engranajes (3.3.2.2) y una breve explicación del nuevo enfoque de diseño mediante subdivisiones (3.3.2.3). Se sigue con la descripción del diseño de la falange proximal (3.3.2.4), que es donde irá alojado el servo desmontado, y del dedo completo (3.3.2.5) donde se introducirá el concepto de huella utilizado en este trabajo. Para terminar se presenta el diseño de la palma inferior (3.3.2.6), donde irán alojados los servos de las falanges proximales, y de la superior (3.3.2.7) que a su vez hará de carcasa y concluirá el diseño de la mano.

3.3.2.1 Integración de servo en la falange proximal

Si se desea crear una estructura que soporte un servomotor, es necesario disponer de un modelo preciso de éste. Este modelo se puede obtener a partir de las especificaciones del fabricante, o directamente midiendo los componentes reales físicos. En ocasiones los fabricantes no revelan todas las especificaciones de sus productos (e.g. subcomponentes internos), por lo que nos vemos obligados a utilizar el segundo método, medir directamente.

En el interior del servomotor TowerPro MG-90 podemos encontrar los siguientes componentes. En la Ilustración 91, se pueden apreciar todos los componentes excepto el potenciómetro que está en la parte inferior del tren de engranajes primario, oculto por la carcasa:

- Potenciómetro
- Tren de engranajes rectos primario
- Tren de engranajes rectos secundario
- Rodamiento de salida
- Motor
- Electrónica

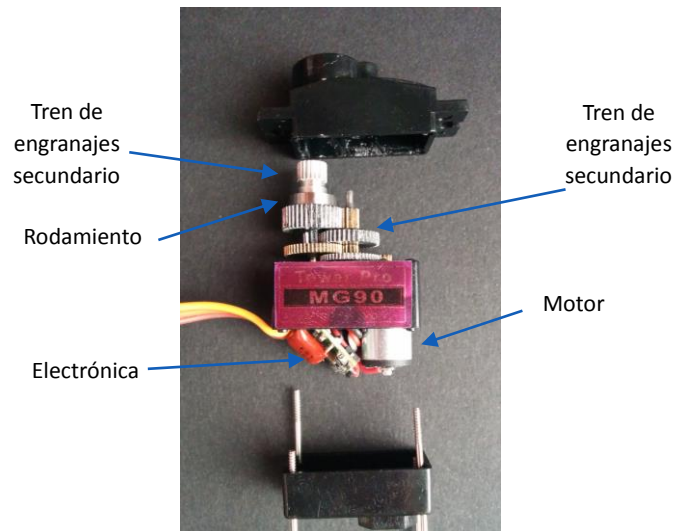


Ilustración 91: Partes del servomotor TowerPro MG-90

Para modelar los engranajes rectos se han de saber dos variables -que normalmente son el número de dientes, diámetro externo o módulo- y el resto se halla según la norma en base a la cual se está diseñando, por ejemplo, una ISO o una AGMA. Se desconoce el tipo de norma utilizada por el fabricante.

Para hacer el modelo de cada engranaje se cuenta el número de dientes y se mide el diámetro externo. El número de dientes es un dato en el que no hay error más que el humano, pero en el de medida del diámetro entra también el error del instrumento de medida. Los engranajes se miden con un calibre digital de 10 micras de precisión no reglado. Esto es, que no se conoce su error, luego es prudente tomar la precisión del calibre como 100 micras. Esto es un problema porque los dientes del engranaje miden aproximadamente entre 30 y 50 micras según el engranaje.

Puesto que no se dispone de un instrumento de medida lo suficientemente preciso como para que se consiga hacer un modelado realista, ni de la norma que se utiliza para el diseño de estos, se decide que las medidas de los engranajes serán orientativas y que el diseño ha de alcanzar su funcionalidad en base a prueba y error.

Debido a esta filosofía, se opta por hacer una plataforma sobre la que montar los componentes. Como no se puede hacer un modelo preciso para el funcionamiento correcto de los engranajes, se decide fijar uno de los ejes y hacer el otro móvil. Una vez se encuentre el punto de engrane de los dos trenes, se fija el eje móvil consiguiendo así un engrane a medida para ese actuador. El tren ajustable elegido es el secundario.

Para la prueba de concepto y comprobar la viabilidad de la idea, se diseña una plataforma auxiliar hecha a medida que se puede apreciar en la Ilustración 92.

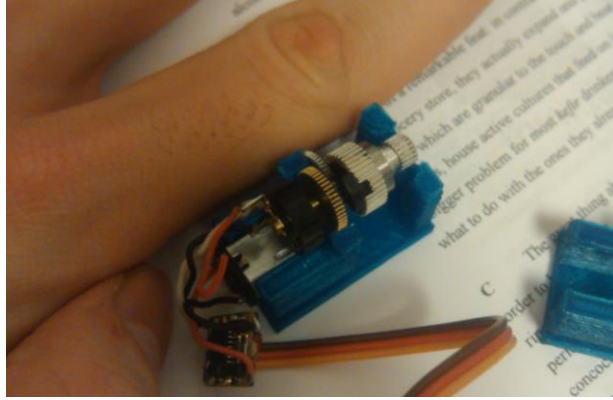


Ilustración 92: Plataforma para validar la idea del desmontaje del servo

Los resultados fueron válidos y se comprobó que, a falta de mejorar la plataforma, la idea era viable y que por tanto se podía integrar el servo dentro de la falange proximal haciendo una cuna, similar a la plataforma, pero integrándola en la falange.

3.3.2.2 Diseño de engranajes

Para transmitir el movimiento del servo al eje se ha de utilizar un sistema de transmisión que:

- Maximice la eficiencia
- Contenga poco juego
- Cambie el eje de giro 90°

Debido a estos requisitos la opción elegida, en base a la Tabla 4, son los engranajes cónicos.

Los engranajes que se han de diseñar son dos subcomponentes de un dedo y se distinguen 2. Ambos tienen el mismo módulo, relación de transmisión, ángulo de presión y anchura de cara de diente, para facilitar el control. Solo se diferencian en dos aspectos: uno tendrá geometría de piñón y su eje nominal será de 3mm; mientras que el otro tendrá tipología de engranaje y el diámetro de su eje nominal serán 5mm. Esto es así porque la salida del servo (engranaje) tiene 5mm, que transmite la fuerza al eje del dedo (piñón) donde, debido a una limitación del eje mínimo interior de los cojinetes Icus, será de 3mm.

En primera instancia los engranajes se generan con la librería Toolbox de Solidworks dando lugar a un engranaje y piñón con las siguientes características:

Tabla 7: Características engranajes revisión 3

Característica	Valor
Módulo	0.8
Numero de dientes	12
Angulo de presión	20
Anchura de cara de diente	12

En la Ilustración 93 se puede ver una imagen del engranaje de 5 mm de diámetro de eje nominal.

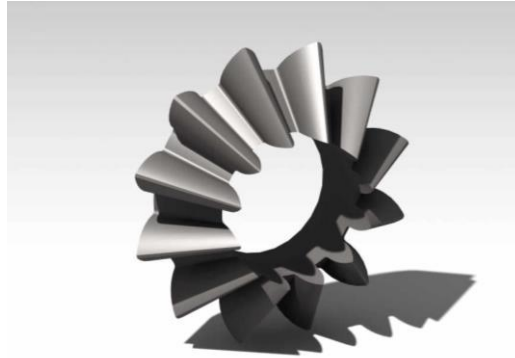


Ilustración 93: Engranaje M0.8, PA20, Z12, FW12, 5 mm diámetro nominal

Estas características se eligen debido a la seguridad que se tiene de que se pueden fabricar manteniendo un buen compromiso entre calidad, acabado y coste. A sabiendas de que no es recomendable diseñar engranajes con menos de 18 dientes con un ángulo de presión de 20º, se toma este diseño como prueba para validar la idea del uso de engranajes cónicos como transmisión entre el servo y el eje, y no tanto en la búsqueda del sistema de transmisión óptimo.

3.3.2.3 Nurbs

Mientras que el diseño tradicional del ingeniero mecánico se corresponde con la utilización de 'sketchs' o dibujos 2D que luego se pueden extruir, rotar o utilizar para cualquier tipo de operación que genere una superficie o volumen en 3D, esta forma de diseño tiene sus limitaciones y una de ellas es el control de la forma.

La generación de superficies complejas con este método es tediosa o imposible en algunos casos y, como uno de los requisitos de este prototipo es hacer un diseño más humano y orgánico, se decide utilizar otra técnica de diseño que surgió en respuesta a este problema.

Para el diseño de la carcasa del nuevo prototipo se va a usar el módulo Imagine & Shape de CATIA V5 que permite el diseño mediante subdivisiones. Este módulo hace uso de NURBS, que es la utilización de puntos y curvas de control para la generación de superficies y volúmenes.

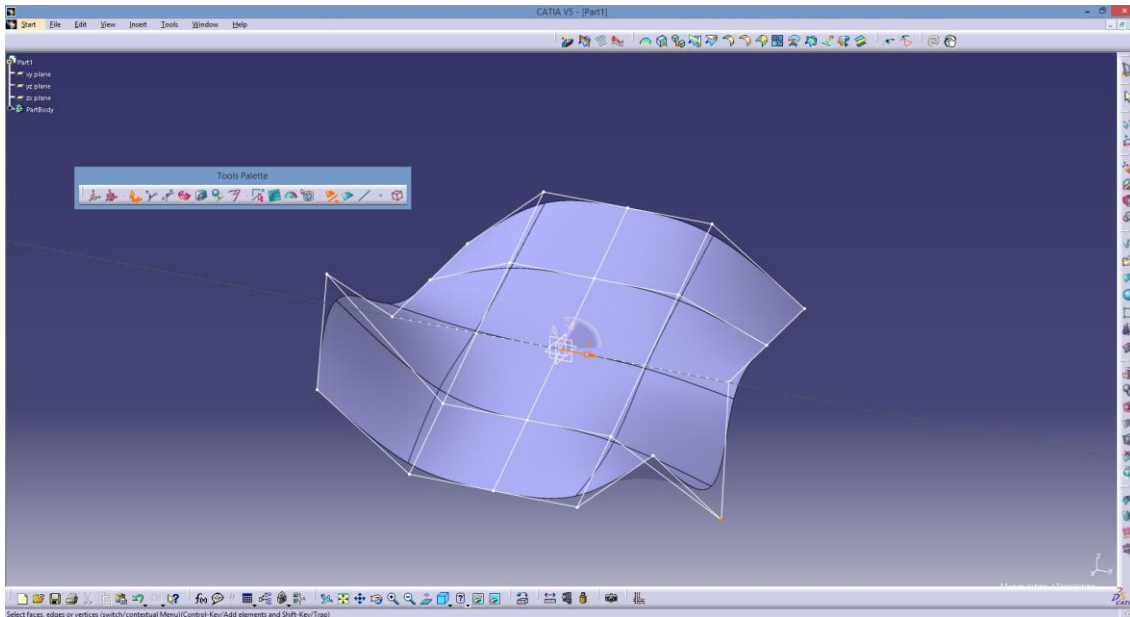


Ilustración 94: Ejemplo de generación de una superficie con NURBS

3.3.2.4 Falange proximal

Para el diseño de la falange proximal se opta por hacer un diseño abierto en la parte inferior que facilite el montaje del servo. Además se añaden cunas para los imanes, que serán explicados en el siguiente epígrafe, y las cunas de los cojinetes Igus. La plataforma del servo anteriormente diseñada se adapta a la falange, cambiando algunas formas pero conservando la misma filosofía del tren secundario de engranajes ajustable.

Sabiendo que el método de fabricación va a ser impresión 3D, el modelo puede integrar también el diseño de los engranajes de modo que tanto los ejes como el sistema de transmisión, se integran dentro del diseño. Todo se enmarca dentro de las proporciones antropomórficas de 2.1.1.4, y el resultado alcanzado fue el que se puede ver en la Ilustración 95.

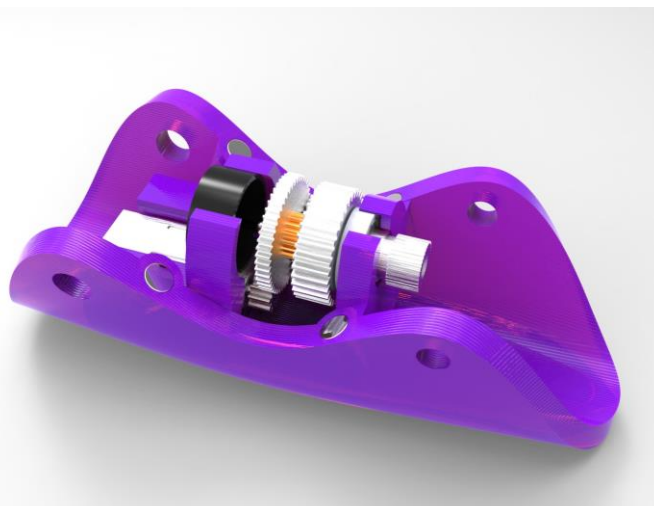


Ilustración 95: Falange proximal con servo integrado

3.3.2.5 Dedo completo

Una vez con el diseño de la falange proximal terminado y validado se pasa a diseñar el resto del dedo. Otro de los objetivos de este prototipo era que su mantenimiento fuese sencillo. En esta línea surgió la idea de las huellas intercambiables.

Una huella en este prototipo se entiende como aquella parte que está en contacto con el objeto a manipular. En el diseño de la falange proximal, por ejemplo, se distinguen dos piezas (Ilustración 96), por un lado la pieza que ha sido presentada anteriormente que está abierta en su parte inferior para facilitar el montaje del servo y, por otro lado, la huella, que es la que estará en contacto con el objeto.

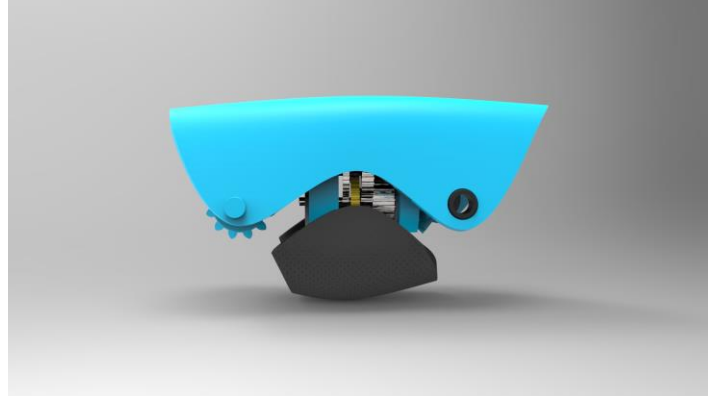


Ilustración 96: Ejemplo separación falange proximal y huella

La huella conserva las mismas proporciones orgánicas y puede ser de un material diferente a la carcasa. Por ejemplo se pueden hacer huellas de diferentes materiales para comprobar de forma analítica que material es mejor según el agarre. Además se pueden introducir en ellas sensores de cualquier clase según las necesidades (véase Ilustración 97).

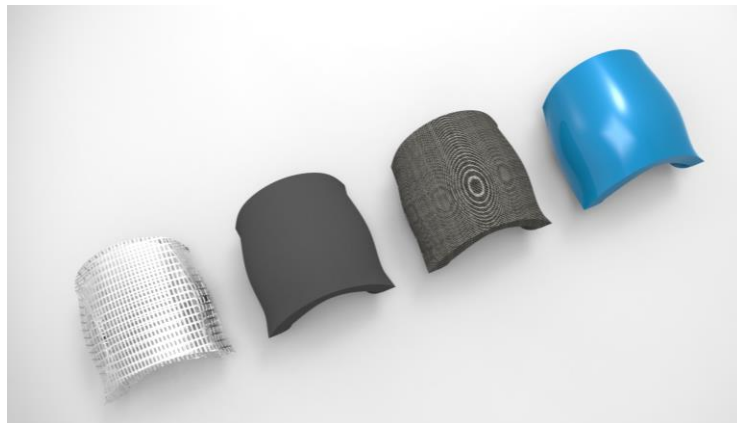


Ilustración 97: Ejemplos de huella proximal con diferentes materiales

Esta separación de falange-huella tiene considerables ventajas respecto a las demás manos robóticas excepto que aumenta la complejidad del sistema y, por tanto, su mantenimiento. Es por ello, que se decide hacer una fijación mediante imanes. Este sistema resulta ser muy cómodo además de seguro, así que se introduce en todas las uniones rápidas del prototipo 2.0.

El diseño final tiene una longitud total de 81,42 mm, dentro de los márgenes impuestos en la Ilustración 11, una anchura de 22,81 mm en la falange proximal (véase Ilustración 13) y una anchura de 16,22 mm (véase Ilustración 15). Todas las medidas antropomórficas del dedo están dentro de los límites marcados y además el diseño de la huella de la falange distal está inspirado en la sección sagital de un dedo humano (Ilustración 16). El diseño final del dedo completo con los actuadores se puede ver en las ilustraciones de la 98 a la 101.

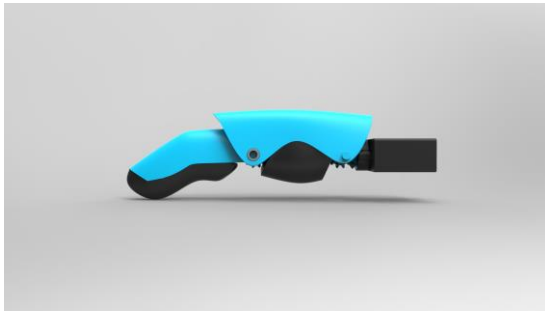


Ilustración 98: Dedo completo prototipo 2.0 - 1



Ilustración 99: Dedo completo prototipo 2.0 - 2

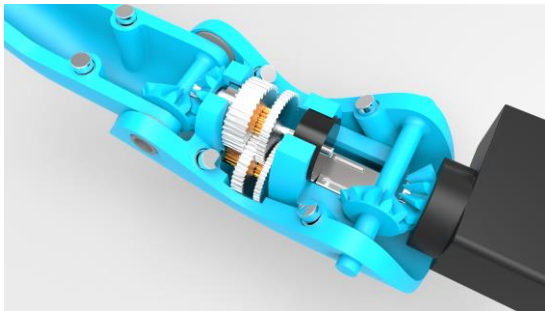


Ilustración 100: Dedo completo prototipo 2.0 - 3

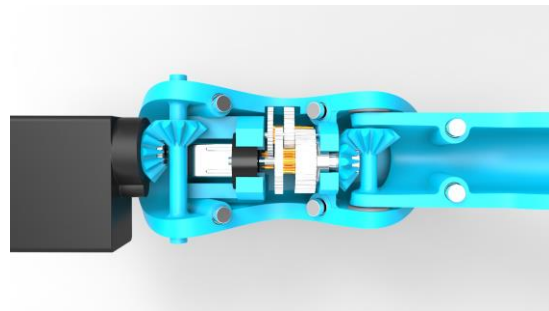


Ilustración 101: Dedo completo prototipo 2.0 - 4

Como se puede ver en las imágenes anteriores, ambas transmisiones son mediante engranajes cónicos y el servo de la falange proximal se conserva íntegramente y sin desmontar.

Para el montaje de la falange proximal y la distal se diseña un modelo de montaje por deformación. Esto es que hay que deformar una de las dos piezas que encajan para que se lleve a cabo la fijación.

Para ver si este tipo de montaje era viable se recurre a hacer un análisis mediante elementos finitos (FEM). Teniendo las propiedades del material en el que va a ser fabricado proporcionadas por el fabricante se hace un estudio para ver si con 20N, una fuerza que puede considerarse fácilmente alcanzable por un humano, se puede deformar lo suficiente como para que encajen las piezas.

Se hacen dos tipos de análisis, deformando la falange proximal (Ilustración 102) y deformando la distal (Ilustración 103). El resultado es que aplicando esa fuerza, la falange proximal se deforma lo suficiente como para que el montaje sea posible, rígido y estable.

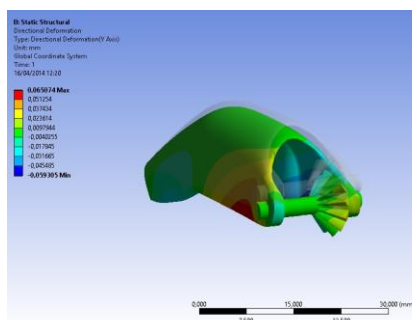


Ilustración 102: Análisis FEM en falange proximal 20N deformación 0,06mm

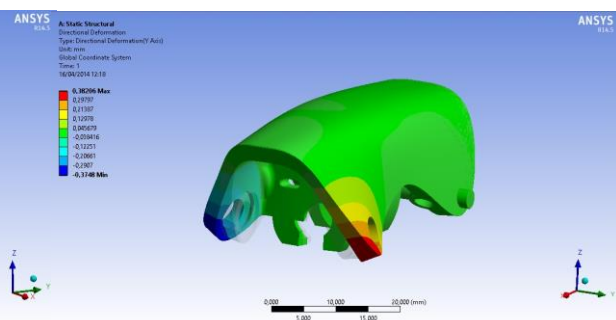


Ilustración 103: Análisis FEM en falange proximal 20N deformación 0,38mm

3.3.2.6 Palma inferior

La política de diseño de la modularidad hace que el diseño de los dedos sea igual, exceptuando la posición de los engranajes. Por tanto ya es necesaria una palma sobre la que trabajar. Antes del diseño de la palma se diseñó la cuna de los servos igual que se hizo con el dedo.

En este caso, el servo de la falange proximal no se desmonta, se pone integro. Para ello se diseña una cuna que se adapta a la forma de la carcasa con un ajuste prieto que impide los movimientos en el plano XY y para la fijación en Z se diseñan unas aletas que permiten la introducción del servo pero se inmoviliza una vez introducido.

Esta estructura (Ilustración 104) se fabrica con la impresora 3D de bajo coste y se optimiza el diseño para que el ajuste sea prieto.

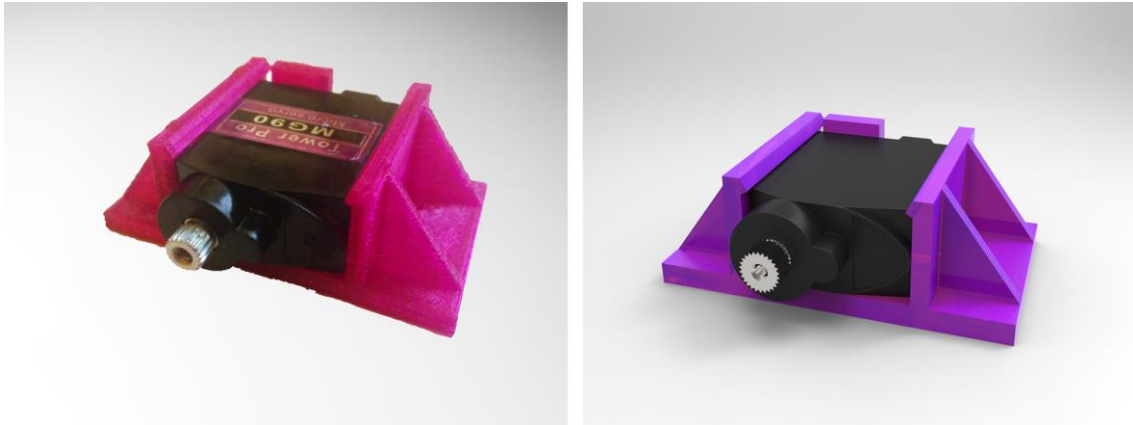


Ilustración 104: Cuna de prueba para el alojamiento de los servos proximales

Con una cuna sobre la que colocar los servos se pasa a diseñar la palma. Se parte de las medidas del prototipo 1.0 y luego se adapta a los nuevos criterios de antropomorfismo y cunas de los servos.

También se introduce el concepto de huella aquí y se distinguen tres tipos de huellas: la de los dedos, la del pulgar y la opuesta al pulgar.

Finalmente se modelan las cunas de los cojinetes de la falange proximal donde se hará la unión de los dedos con la palma y el resultado se puede ver en la Ilustración 105.

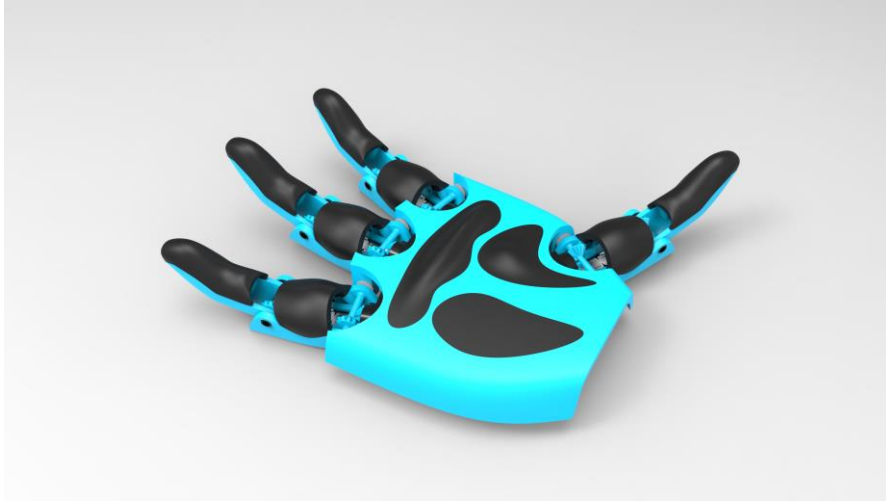


Ilustración 105: Prototipo 2.0 con dedos y palma inferior

Los servos que mueven las falanges proximales alojados en la palma se pueden observar en la Ilustración 106.

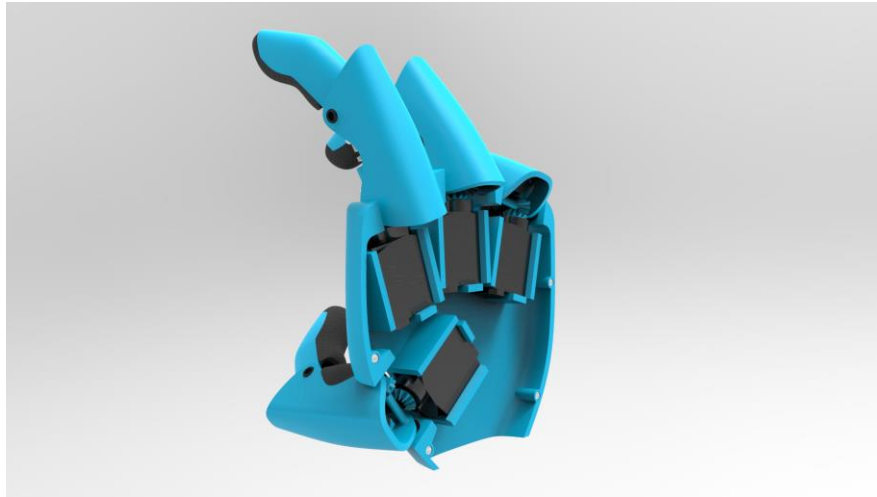


Ilustración 106: Palma con servos alojados

Como se puede observar en la ilustración anterior, también se incorporan imanes para la fijación de la palma inferior y superior.

Las medidas finales del diseño fueron 108,35mm para el ancho y 180,49 para el largo con los dedos extendidos. Según la Ilustración 7, la longitud de la mano está dentro del rango aceptable y la anchura también (Ilustración 9). No obstante, se puede apreciar que la anchura de la mano es no congruente visualmente con el resto de la mano.

3.3.2.7 Palma superior

Para terminar, se diseña la palma superior. Esta tiene un carácter principalmente estético y, como ya se ha comentado antes, la fijación se hace mediante imanes. Esta se diseña teniendo en cuenta los movimientos máximos que van a alcanzar los dedos. Se puede ver la mano completa en la Ilustración 107 y en la Ilustración 108.

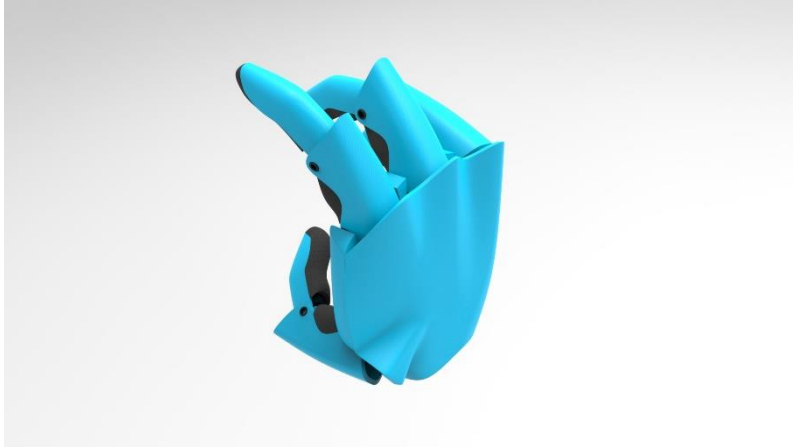


Ilustración 107: Prototipo 2.0 diseño completo - 1



Ilustración 108: Prototipo 2.0 diseño completo - 2

3.3.3 Simulación

A continuación se muestra el prototipo cogiendo o realizando una serie de acciones definidas por el autor. En este caso los objetos a coger son:

- Baraja de cartas
- Bolígrafo
- Botella grande
- Cantimplora mediana
- Cazo
- Copa de cava
- Cuchara
- Destornillador
- Libro abierto
- Llavero
- Pelota de baloncesto
- Pelota de tenis
- Piano
- Pila AA
- Portatizas
- Rotulador gordo
- Soldador
- Teclado de ordenador



Ilustración 109: Simulación prototipo 2.0 - Baraja

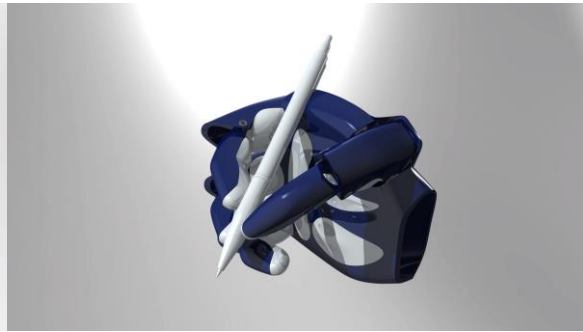


Ilustración 110: Simulación prototipo 2.0 - Bolígrafo



Ilustración 111: Simulación prototipo 2.0 - Botella grande

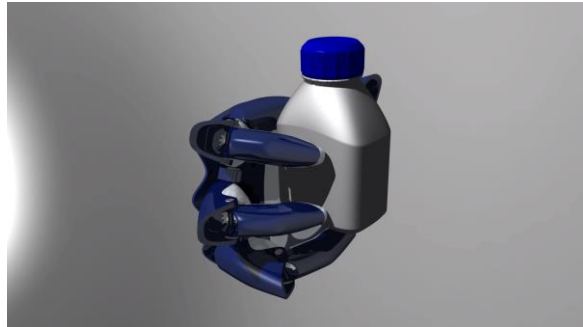


Ilustración 112: Simulación prototipo 2.0 - Cantimplora



Ilustración 113: Simulación prototipo 2.0 - Cazo

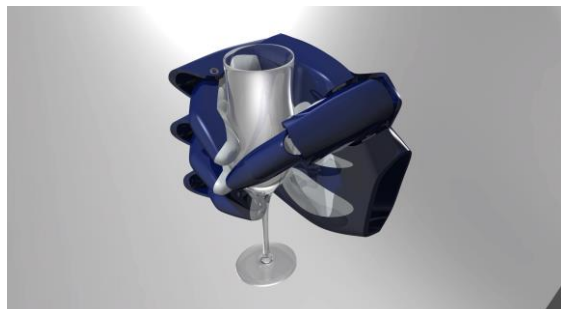


Ilustración 114: Simulación prototipo 2.0 - Copa de cava



Ilustración 115: Simulación prototipo 2.0 - Cuchara



Ilustración 116: Simulación prototipo 2.0 - Destornillador



Ilustración 117: Simulación prototipo 2.0 - Libro

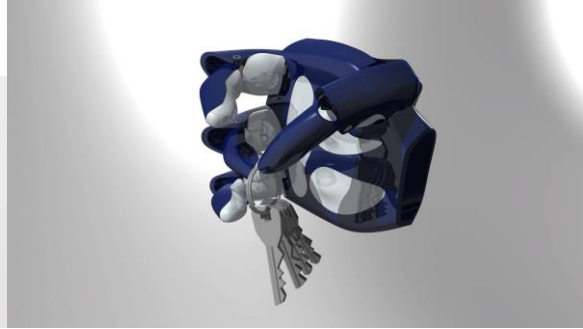


Ilustración 118: Simulación prototipo 2.0 - Llavero

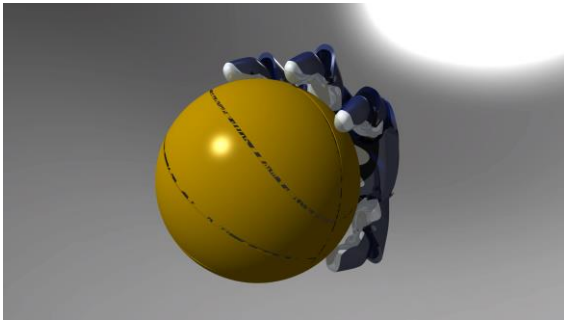


Ilustración 119: Simulación prototipo 2.0 - Pelota de baloncesto

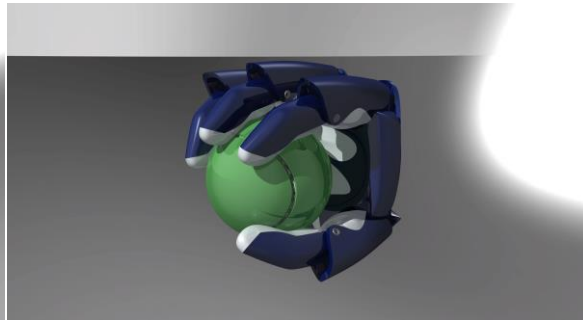


Ilustración 120: Simulación prototipo 2.0 - Pelota de tenis



Ilustración 121: Simulación prototipo 2.0 - Piano



Ilustración 122: Simulación prototipo 2.0 - Pila AA



Ilustración 123: Simulación prototipo 2.0 - Portatizas

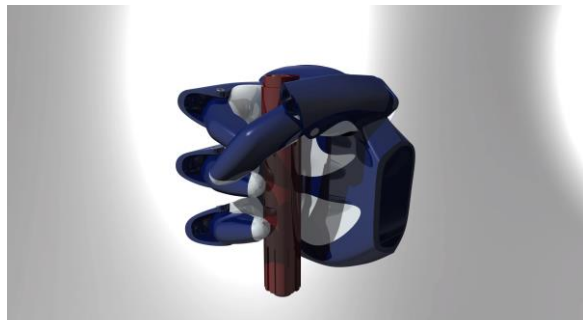


Ilustración 124: Simulación prototipo 2.0 - Rotulador gordo

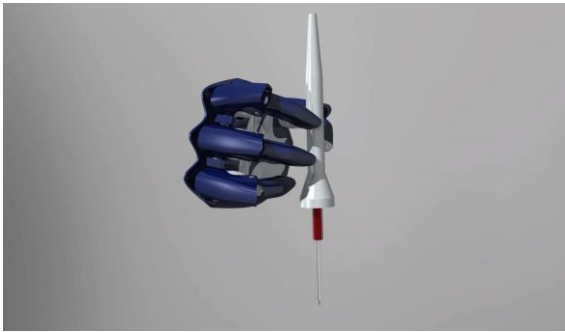


Ilustración 125: Simulación prototipo 2.0 - Soldador



Ilustración 126: Simulación prototipo 2.0 - Teclado de ordenador

3.3.4 Fabricación y puesta en marcha

En esta ocasión debido a la forma compleja de las falanges y al alto nivel de detalle, no se pudieron fabricar las falanges con la impresora 3D de bajo coste. Las pruebas que se hicieron, a pesar de que en teoría era fabricable como se puede ver en la Ilustración 127, no fueron satisfactorias:

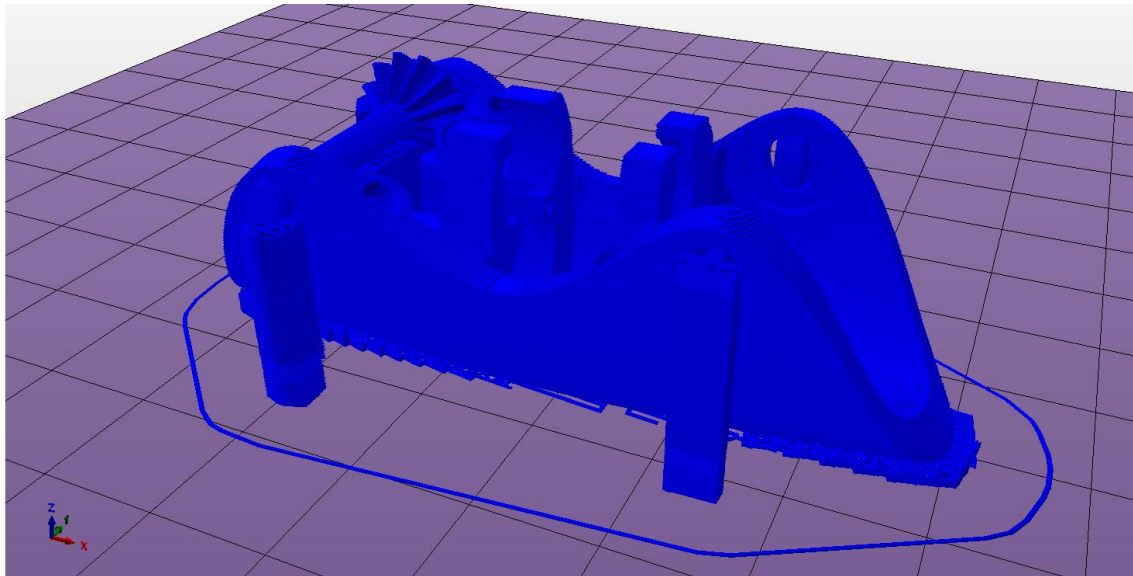


Ilustración 127: Visualizador Gcode Repetier-Host. Falange Proximal.

En la práctica no respondía a los requisitos mínimos de tolerancia y precisión, así que se tuvo que optar por otros métodos de fabricación (véase Ilustración 129).

Debido a la compleja geometría, a la baja cantidad del lote y a requisito de mantenerse en el bajo coste se hizo un estudio comparativo entre las tecnologías de SLS (Sintonización láser selectiva) y SLA (Estereolitografía). Debido a que las propiedades mecánicas eran relativamente parecidas se optó por SLS debido a que el precio era menor.

En un principio se fabricó un solo dedo como prueba de concepto donde se querían validar:

- Tolerancias.
- Validación de la idea de las huellas con intercambio rápido basado en imanes.
- Validación de la transmisión cónica.
- Validación del diseño de la cuna del servo integrada en la falange.

- Validación del diseño general en forma y tamaño.
- Validación del SLS como método de fabricación alternativo.

Los resultados de las piezas fueron:



Ilustración 128: Dedo índice fabricado por SLS en PA2200



Ilustración 129: Comparación de tecnologías de fabricación. FDM de bajo coste vs SLS

El proceso de montaje comienza con el desmontaje de un servo, la limpieza con alcohol de sus componentes y su consiguiente montaje dentro de la falange proximal.

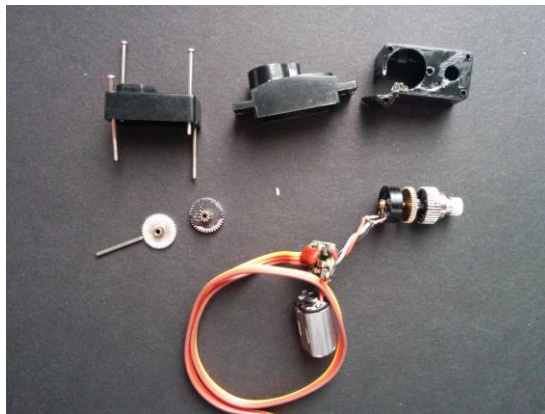


Ilustración 130: TowerPro MG90 desmontado



Ilustración 131: Limpieza de las piezas con alcohol

Una vez concluido el montaje, se pueden pegar los imanes, poner los cojinetes y unir ambas falanges. En la Ilustración 132 se puede ver una imagen del dedo montado exceptuando el servo y en Ilustración 133 el dedo completo con el servo ya integrado.



Ilustración 132: Dedo índice con imanes y casquillos montados.

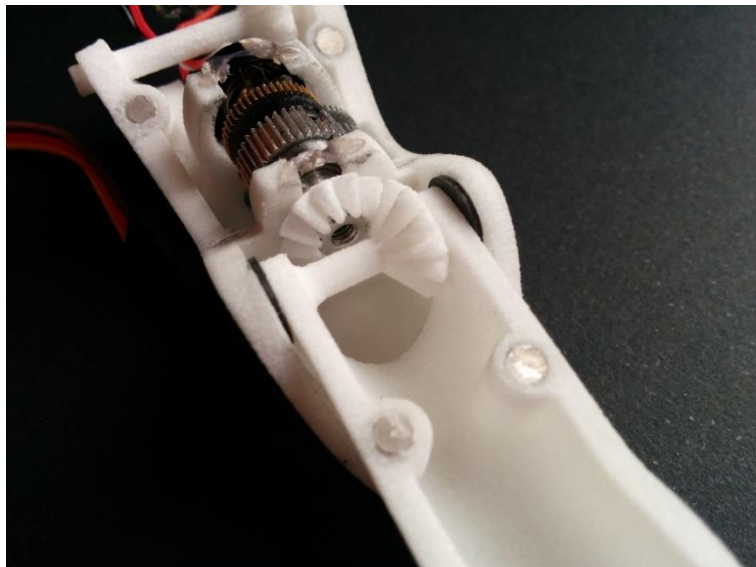


Ilustración 133: Integración completa del servo dentro de la cuna de la falange.

Como ya se comentó anteriormente, este diseño contempla que el tren primario de engranajes se fija mientras que el secundario es móvil. Luego para el montaje de estos, primero se coloca el tren primario, se fija y posteriormente se coloca el secundario en una posición de engrane completo y se fija con pegamento.

Por último en la Ilustración 134 se puede ver una fotografía del dedo montado y con una mano humana para poder comparar.



Ilustración 134: Dedo completo con dedo humano de referencia

3.3.5 Análisis de resultados

Por plazos del proyecto finalmente no se pudo construir la mano entera, pero sí que se fabricó y construyó un dedo con el que se pudieron concluir que:

- La integración del servo dentro de la falange proximal es posible
- La idea de los imanes ha demostrado ser válida y útil
- Todas las geometrías y tolerancias son satisfactorias

No obstante se encontró con que, una vez montado, el juego de los engranajes era patente. Este no es muy importante a la hora de agarrar objetos, pero sí que lo es a la hora de manipular objetos con precisión.

Además, se encontró otro problema y es que el fijamiento del tren secundario con pegamento no resultó ser todo lo efectiva que debiese y, mientras que en un sentido los engranajes respondían de manera correcta, en el otro desengranaban. Esto resultaba con que podía mover pequeñas cantidades de peso, incluyéndose a sí mismo, pero al hacer mucha fuerza desengranaba.

No obstante, es un problema localizado y ahora que se tiene un prototipo del que se ha obtenido experiencia, el siguiente diseño tendrá en cuenta este problema.

El funcionamiento del servo puede verse en el video³.

³ <https://www.youtube.com/watch?v=oNeZFB7E27A>

4. Presupuesto

Coste laboral

Apellidos y Nombre	Categoría	Horas dedicadas	Coste por hora	Coste
Rodríguez Marín, Jorge	Ingeniero	110	25 €/h	2750 €
González Victores, Juan Carlos	Ingeniero Senior	22	50 €/h	1100 €
Martínez de la Casa, Santiago	Ingeniero Senior	22	50 €/h	1100 €
Total				4950 €

Coste material

Prototipo	Descripción	Cantidad	Coste unitario	Coste
Prototipo 1.0	Igus GFM-0304-03	16	1,43 €	22,88 €
	Servomotores	8	3,08 €	24,64 €
	Varillas latón 3mm 1m	1	2,40 €	2,40 €
	Piezas	1	2,88 €	2,88 €
	Correas 1m	1	1,40 €	1,40 €
	Poleas	8	5,40 €	43,20 €
	Material fungible	1	10,00 €	10,00 €
Subtotal				107,40 €
Prototipo 2.0	Igus GFM-0304-02	8	1,43 €	11,44 €
	Igus GFM-0304-03	8	1,43 €	11,44 €
	Servomotores	8	3,08 €	24,64 €
	Piezas	1	420,00 €	420,00 €
	Imanes 2x3mm	28	0,14 €	3,92 €
	Material fungible	1	10,00 €	10,00 €
Subtotal				481,44 €
Total				588,84 €

Coste de equipo

Descripción	Coste	% de uso	Duración [meses]	Depreciación	Coste atribuible ⁴
Impresora 3D	400	10%	0,5	36	0,56 €
Arduino UNO	4,12	100%	0,1	60	0,01 €
Workstation Dell M3800	2200	100%	1	36	61,11 €
Herramientas	100	100%	1	60	1,67 €
Total					63,34 €

⁴ Coste calculado mediante $\frac{\text{Coste} * \% \text{ de uso} * \text{Duración}}{\text{Depreciación}}$

Licencias de software

Descripción	Coste	% de uso	Duración [meses]	Depreciación	Coste atribuible
Catia V5	29890,58	100%	2	12	4.981,76 €
	16219,65				
Ansys 14.5		1 100%	0,1	12	135,16 €
Total					5.116,93 €

Coste Laboral	4.950,00 €
Coste Material	588,84 €
Coste Equipo	63,34 €
Coste Software	5.116,93 €
Costes indirectos (20%)	1.153,82 €
TOTAL	6.922,93 €

5. Conclusiones y mejoras futuras

Para terminar, en este capítulo se concluye con algunas ideas principales y conclusiones de ambos prototipos. Se añade también un apartado con algunas ideas para la continuación del proyecto, así como unas conclusiones finales del mismo.

Prototipo 1.0

En el primer prototipo se quiso demostrar principalmente tres ideas:

1. La primera era que se podía hacer una mano de bajo coste actuada mediante servomotores, que son comunes y se pueden adquirir de muchos proveedores.
2. Además, los servomotores se podían integrar dentro de la palma.
3. Se demostró que todo el prototipo puede ser fabricado mediante las impresoras 3D de bajo coste, aumentando así la accesibilidad del prototipo a otros laboratorios.

Las tres ideas fueron comprobadas y validadas, aunque no se consiguió hacer un prototipo totalmente funcional, porque existía un problema: el sistema de transmisión. Las correas demostraron no ser el mejor método de transmisión de movimiento debido a que el autor no fue capaz de montarlas de manera precisa y estable. De modo que se concluyó que para el siguiente prototipo:

1. O bien se rediseña el sistema de correas orientándose a la fabricación y el montaje;
2. o se modela otro tipo de solución.
3. Y se han de mantener las tres ideas originales, puesto que han demostrado ser válidas.

Prototipo 2.0

Con la experiencia acumulada del primer prototipo se decidió hacer un nuevo prototipo. En este caso se continuaba con las ideas originales y se añadía:

1. El modelo debía tener forma más orgánica.
2. Se intentaría validar la idea de desmontar un servomotor y remontarlo dentro de una falange.
3. Además, se cambiaría el sistema de transmisión por engranajes cónicos, eliminando el problema principal del prototipo 1.0.
4. Se desarrollaría un sistema de huellas intercambiables con intercambio rápido que ampliaría la utilidad del prototipo para hacer módulos sensorizados intercambiables, y además mejoraría su facilidad de montaje.

Todas estas ideas fueron demostradas y validadas gracias a la fabricación de un dedo, excepto la de la utilización de impresoras 3D de bajo coste para la fabricación del prototipo. En cambio se recurrió a otro tipo de impresión 3D, más cara, pero con un precio que encaja dentro de la filosofía del proyecto.

No obstante, del prototipo funcional se encontró que:

1. Los imanes no son el mejor sistema de fijación. Aunque sí que se demuestra su utilidad como sistema de intercambio rápido, habría que rematar su utilidad con otro sistema de fijación, como por ejemplo, un machi-hembrado de las piezas a fijar.
2. Los engranajes demostraron tener una holgura no tan importante para el agarre de objetos, pero sí para la manipulación de objetos.

3. El diseño se puede mejorar para hacerlo más fácil a la hora del montaje, especialmente en la integración del actuador en la falange.

Futuras mejoras

El autor considera que se ha de seguir en la línea de investigación de la integración de los motores dentro de las falanges, despejando la palma y sobre todo haciendo que la integración sea totalmente dentro de la mano sin recurrir al antebrazo.

Se ha de mantener la simplificación de la fijación de la falange distal y media pero, en este caso el servomotor de la PIP (véase Ilustración 5) ha de estar en la falange distal, en vez de la proximal (como en el prototipo 2.0) y el de la MCPa en la falange proximal, en lugar de dentro de la palma. De este modo se liberaría la palma para añadir actuadores en las MCPb que permitirían hacer una manipulación en mano de objetos completa y no solo agarre.

El problema de backlash encontrado en el prototipo 2.0 se puede solucionar haciendo una mejora en el sistema de transmisión que, manteniéndose los engranajes cónicos, estos pasan a ser helicoidales. Mediante la herramienta GearTrax se han podido modelar unos engranajes cónicos helicoidales y en la Ilustración 135 se puede ver una comparación.

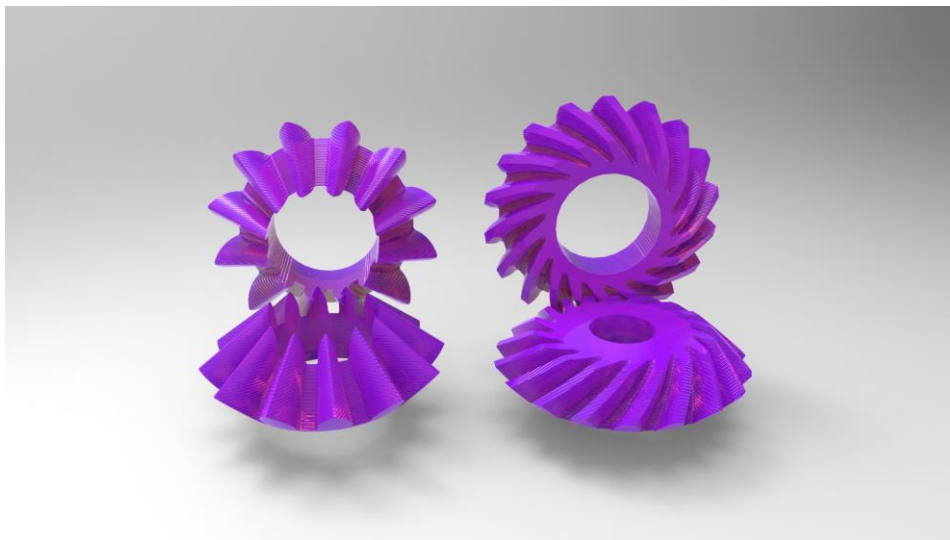


Ilustración 135: Comparación de engranajes cónicos rectos vs cónicos helicoidales

Conclusiones

Se ha presentado una solución como mano robótica actuada y con todos los actuadores integrados, pero más importante es la validación de tres ideas principales de cara a futuros prototipos:

1. Los actuadores han de ir integrados en las falanges y existe la tecnología y los medios en nuestros días para hacerlo.
2. Se ha de continuar con la idea de huellas intercambiables como vector de futuros experimentos para hallar de forma analítica la forma óptima de dedos y agarre, así como fácil integración de cara a sensores como presión, tacto o temperatura.
3. Todo el proyecto se puede mantener dentro de la franja del bajo coste para un posible salto a la fabricación en masa, ya no solo para prototipos robóticos, si no para prótesis humanas que sean asumibles y fáciles de adquirir.

Bibliografía

- [1] S. Jacobsen, E. Iversen, D. Knutti, R. Johnson and K. Biggers. Design of the utah/MIT dextrous hand. Presented at Robotics and Automation. Proceedings. 1986 IEEE International Conference On. 1986, .
- [2] S. Martínez, C. Monje, A. Jardón, P. Pierro, C. Balaguer and D. Muñoz. TEO: Full-size humanoid robot design powered by a fuel cell system. *Cybern. Syst.* 43(3), pp. 163-180. 2012.
- [3] K. Kaneko, K. Harada and F. Kanehiro. Development of multi-fingered hand for life-size humanoid robots. Presented at ICRA. 2007, .
- [4] M. Grebenstein. "Analysis of the current state of robot hands," in *Approaching Human Performance* Anonymous 2014, .
- [5] F. H. Netter. *Atlas of Human Anatomy* 2010.
- [6] M. Gabiccini, G. Stillfried, H. Marino and M. Bianchi. A data-driven kinematic model of the human hand with soft-tissue artifact compensation mechanism for grasp synergy analysis. Presented at Intelligent Robots and Systems (IROS), 2013 IEEE/RSJ International Conference On. 2013, .
- [7] P. Cerveri, E. De Momi, N. Lopomo, G. Baud-Bovy, R. Barros and G. Ferrigno. Finger kinematic modeling and real-time hand motion estimation. *Ann. Biomed. Eng.* 35(11), pp. 1989-2002. 2007.
- [8] Q. Fu and M. Santello. Tracking whole hand kinematics using extended kalman filter. Presented at Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), 2010 Annual International Conference of the IEEE. 2010, .
- [9] A. C. Benjumea. *Aspectos Antropométricos De La Población Laboral Española Aplicados Al Diseño Industrial* 2003.
- [10] M. Chalon, A. Wedler, A. Baumann, W. Bertleff, A. Beyer, J. Butterfaß, M. Grebenstein, R. Gruber, F. Hacker and E. Kraemer. Dexhand: A space qualified multi-fingered robotic hand. Presented at Robotics and Automation (ICRA), 2011 IEEE International Conference On. 2011, .
- [11] Y. LIU, M. JIN and H. LIU. DLR/HIT dextrous robot hand. *Journal of Harbin Institute of Technology* 5pp. 012. 2009.
- [12] J. Butterfaß, M. Grebenstein, H. Liu and G. Hirzinger. DLR-hand II: Next generation of a dextrous robot hand. Presented at Robotics and Automation, 2001. Proceedings 2001 ICRA. IEEE International Conference On. 2001, .

- [13] A. Wedler, M. Chalon, A. Baumann, W. Bertleff, A. Beyer, R. Burger, J. Butterfass, M. Grebenstein, R. Gruber and F. Hacker. DLRs space qualifiable multi-fingered DEXHAND. Presented at Proc.: 11th Symposium on Advanced Space Technologies in Robotics and Automation (ASTRA).
- [14] H. Iwata and S. Sugano. Design of human symbiotic robot TWENDY-ONE. Presented at Robotics and Automation, 2009. ICRA'09. IEEE International Conference On. 2009, .
- [15] J. Bae, S. Park, J. Park, M. Baeg, D. Kim and S. Oh. Development of a low cost anthropomorphic robot hand with high capability. Presented at Intelligent Robots and Systems (IROS), 2012 IEEE/RSJ International Conference On. 2012, .
- [16] S. Kajikawa and K. Abe. Development of robot hand with multi-directional variable stiffness for human-care services. Presented at Intelligent Robots and Systems (IROS), 2012 IEEE/RSJ International Conference On. 2012, .
- [17] (). *EH1 Hand*. Available: <http://www.prensilia.com/>.
- [18] H. Kawasaki, T. Komatsu and K. Uchiyama. Dexterous anthropomorphic robot hand with distributed tactile sensor: Gifu hand II. *Mechatronics, IEEE/ASME Transactions On* 7(3), pp. 296-303. 2002.
- [19] M. A. Diftler, J. Mehling, M. E. Abdallah, N. A. Radford, L. B. Bridgwater, A. M. Sanders, R. S. Askew, D. M. Linn, J. D. Yamokoski and F. Permenter. Robonaut 2-the first humanoid robot in space. Presented at Robotics and Automation (ICRA), 2011 IEEE International Conference On. 2011, .
- [20] (). *Servo-electric 5-Finger Gripping Hand*.
- [21] F. Lotti, P. Tiezzi, G. Vassura, L. Biagiotti and C. Melchiorri. UBH 3: An anthropomorphic hand with simplified endo-skeletal structure and soft continuous fingerpads. Presented at Robotics and Automation, 2004. Proceedings. ICRA'04. 2004 IEEE International Conference On. 2004, .
- [22] M. Vande Weghe, M. Rogers, M. Weissert and Y. Matsuoka. The ACT hand: Design of the skeletal structure. Presented at Robotics and Automation, 2004. Proceedings. ICRA'04. 2004 IEEE International Conference On. 2004, .
- [23] L. B. Bridgwater, C. Ihrke, M. A. Diftler, M. E. Abdallah, N. A. Radford, J. Rogers, S. Yayathi, R. S. Askew and D. M. Linn. The robonaut 2 hand-designed to do work with tools. Presented at Robotics and Automation (ICRA), 2012 IEEE International Conference On. 2012, .
- [24] I. M. Bullock, R. R. Ma and A. M. Dollar. A hand-centric classification of human and robot dexterous manipulation. *Haptics, IEEE Transactions On* 6(2), pp. 129-144. 2013.
- [25] M. H. Schieber and M. Santello. Hand function: Peripheral and central constraints on performance. *J. Appl. Physiol.* (1985) 96(6), pp. 2293-2300. 2004. . DOI: 10.1152/jappphysiol.01063.2003 [doi].
- [26] (). *OpenHand*. Available: <http://www.eng.yale.edu/grablab/openhand/>.

- [27] B. Rubinger, P. Fulford, L. Gregoris, C. Gosselin and T. Laliberté. Self-adapting robotic auxiliary hand (SARAH) for SPDM operations on the international space station. Presented at Proceedings of the Sixth International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space ISAIRAS. A New Space Odyssey, Montreal. 2001, .
- [28] A. Schmitz, U. Pattacini, F. Nori, L. Natale, G. Metta and G. Sandini. Design, realization and sensorization of the dexterous iCub hand. Presented at Humanoid Robots (Humanoids), 2010 10th IEEE-RAS International Conference On. 2010, .
- [29] K. Mitsui, R. Ozawa and T. Kou. An under-actuated robotic hand for multiple grasps. Presented at Intelligent Robots and Systems (IROS), 2013 IEEE/RSJ International Conference On. 2013, .
- [30] (). *Elu2 Hand*. Available: <http://www.elumotion.com/Elu2-hand.htm>.
- [31] M. Grebenstein, A. Albu-Schäffer, T. Bahls, M. Chalon, O. Eiberger, W. Friedl, R. Gruber, S. Haddadin, U. Hagn and R. Haslinger. The DLR hand arm system. Presented at Robotics and Automation (ICRA), 2011 IEEE International Conference On. 2011, .
- [32] J. D. Montes and J. D. González. Mecanismos de transmisión y actuadores utilizados en prótesis de mano. 2009.
- [33] G. E. Mullin, L. E. Matarese and M. Palmer. *Gastrointestinal and Liver Disease Nutrition Desk Reference* 2011.
- [34] L. Biagiotti, F. Lotti, C. Melchiorri and G. Vassura. How far is the human hand. *A Review on Anthropomorphic Robotic End-Effectors* 2004.
- [35] C. Lovchik and M. A. Diftler. The robonaut hand: A dexterous robot hand for space. Presented at Robotics and Automation, 1999. Proceedings. 1999 IEEE International Conference On. 1999, .
- [36] (). *Shadow Hand*. Available: <http://www.shadowrobot.com/products/dexterous-hand/>.
- [37] M. Vande Weghe, M. Rogers, M. Weissert and Y. Matsuoka. The ACT hand: Design of the skeletal structure. Presented at Robotics and Automation, 2004. Proceedings. ICRA'04. 2004 IEEE International Conference On. 2004, .
- [38] K. Yamaguchi, Y. Hirata and K. Kosuge. Development of robot hand with suction mechanism for robust and dexterous grasping. Presented at Intelligent Robots and Systems (IROS), 2013 IEEE/RSJ International Conference On. 2013, .
- [39] J. Butterfass, G. Hirzinger, S. Knoch and H. Liu. DLR's multisensory articulated hand. I. hard-and software architecture. Presented at Robotics and Automation, 1998. Proceedings. 1998 IEEE International Conference On. 1998, .
- [40] T. Mouri, H. Kawasaki, K. Yoshikawa, J. Takai and S. Ito. Anthropomorphic robot hand: Gifu hand III. Presented at Proc. Int. Conf. ICCAS. 2002, .
- [41] D. Che and W. Zhang. A dexterous and self-adaptive humanoid robot hand: GCUA hand. *International Journal of Humanoid Robotics* 8(01), pp. 73-86. 2011.

- [42] G. Stellin, C. Cipriani, F. Zaccone, M. Carrozza and P. Dario. Design of an anthropomorphic dexterous hand for a 2-years-old humanoid: Ongoing work. *ICRA07* 2008.

Anexos

Planos cojinetes igus

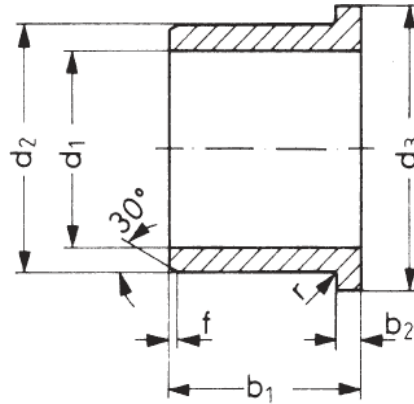


Ilustración 136: Igu GFM (Iglidur G, Forma F, Métrica)

GFM-0405-03

Tabla 8: Especificaciones GFM-0405-03

Características	Valor
Parte	GFM-0405-03
d1 [mm]	4
d2 [mm]	5.5
d3 [mm]	9.5
b1 [mm]	3
b2 [mm]	0.75

GFM-0304-02

Tabla 9: Especificaciones GFM-0304-02

Características	Valor
Parte	GFM-0304-02
d1 [mm]	3
d2 [mm]	4.5
d3 [mm]	7.5
b1 [mm]	2
b2 [mm]	0.5

GFM-0304-03

Tabla 10: Especificaciones GFM-0304-03

Características	Valor
Parte	GFM-0304-03
d1 [mm]	3
d2 [mm]	4.5
d3 [mm]	7.5
b1 [mm]	3
b2 [mm]	0.75

Poliamida de precisión PA 2200 para EOSINT P

Aplicación:

PA 2200 es idónea para el procesamiento en todas las plantas EOSINT P con opción para poliamida de precisión.

El grosor de capa recomendado es de 0,15 mm. El polvo no expuesto puede volverse a usar y, esta finalidad, debe mezclarse con polvo fresco, como mínimo, en la proporción 1:2 hasta 1:1 (nuevo referido al viejo) a fin de garantizar un parámetro de procesamiento constante y calidad homogénea del componente.

Aplicaciones típicas del material son componentes de funcionalidad total en calidad de diseño que estén sometidos a elevadas cargas mecánicas o térmicas.

Datos generales del material:

Granulometría promedia	Curvatura láser	60	µm
Densidad a granel	DIN 53466	0,435 - 0,445	g/cm ³
Densidad sinterizada al láser	Método EOS	0,9 - 0,95	g/cm ³

Valores característicos mecánicos*:

Módulo de tracción E	DIN EN ISO 527	1700 ± 150	N/mm ²
Resistencia a la tracción	DIN EN ISO 527	45 ± 3	N/mm ²
Alargamiento de rotura	DIN EN ISO 527	20 ± 5	%
Módulo de flexión E	DIN EN ISO 178	1240 ± 130	N/mm ²
Resistencia al impacto Charpy	DIN EN ISO 179	53 ± 3,8	kJ/m ²
Resistencia a la resiliencia Charpy	DIN EN ISO 179	4,8 ± 0,3	kJ/m ²
Resistencia al impacto Izod	DIN EN ISO 180	32,8 ± 3,4	kJ/m ²
Resistencia a la resiliencia Izod	DIN EN ISO 180	4,4 ± 0,4	kJ/m ²
Dureza a la presión de bola	DIN EN ISO 2039	77,6 ± 2	
Dureza Shore D	DIN 53505	75 ± 2	

EOS GmbH Electro Optical Systems

Robert-Stirling-Ring 1
D-82152 Krailling / München

Teléfono: +49 (0)89 / 893 36-0
Telefax: +49 (0)89 / 893 36-285
Internet: www.eos.info

Características térmicas:

Punto de fusión	DIN 53736	172 - 180	°C
Temperatura de ablandamiento	DIN EN ISO 306	163	°C
Temperatura de ablandamiento	DIN EN ISO 306	181	°C

* Las características mecánicas pueden variar en función a la posición X, Y y Z del elemento de comprobación y de los parámetros de exposición

Los datos corresponden al estado actual de nuestros conocimientos. No tienen la finalidad de asegurar determinadas características del producto o su idoneidad para una aplicación concreta.

4

3

2

1

4

3

2

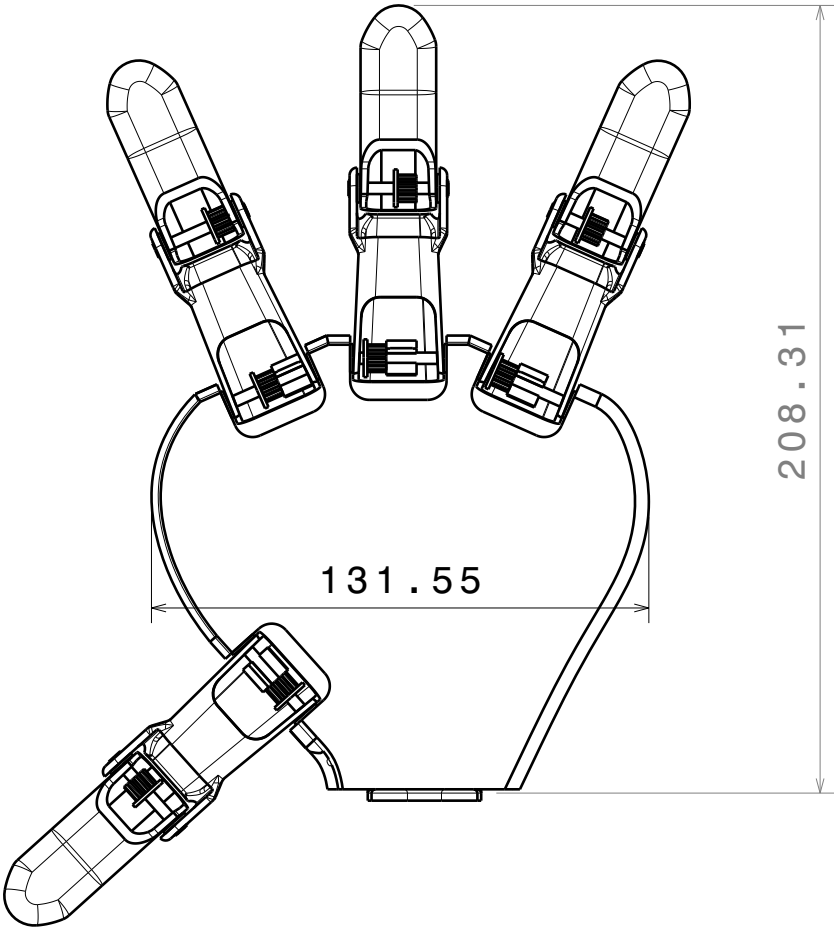
1

D

C

B

A



DESIGNED BY:

Jorge

DATE:

21/06/2014

CHECKED BY:

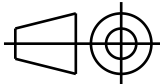
XXX

DATE:

XXX

SIZE

A4



SCALE

1:2

WEIGHT (kg)

DRAWING NUMBER

Prototipo 1.0

SHEET

1/1

I

-

H

-

G

-

F

-

E

-

D

-

C

-

B

-

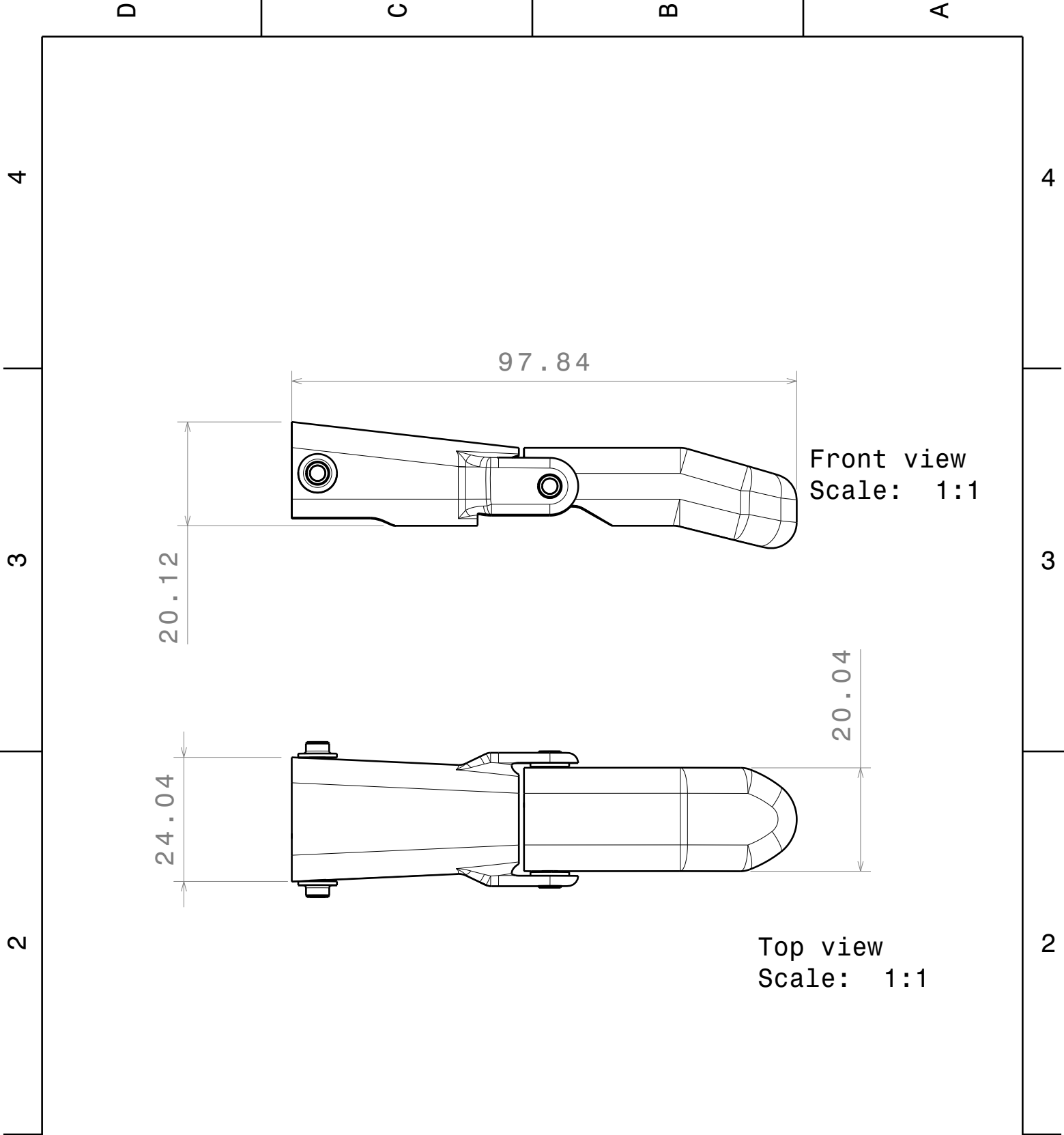
A

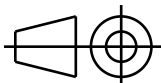
-

This drawing is our property; it can't be reproduced or communicated without our written agreement.

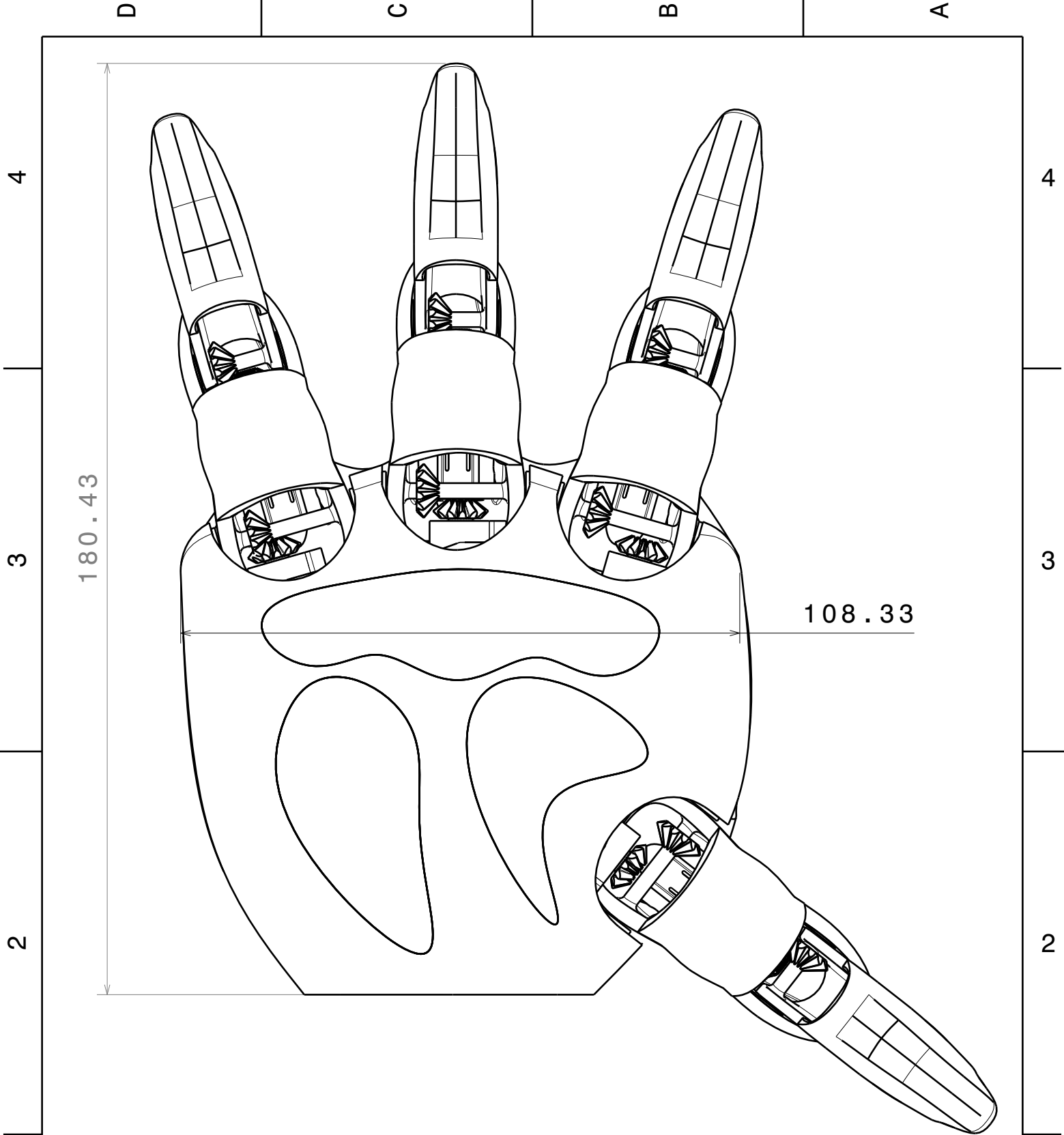
D

A



DESIGNED BY: <div>Jorge</div>				I	—
DATE: <div>21/06/2014</div>				H	—
CHECKED BY: <div>XXX</div>				G	—
DATE: <div>XXX</div>				F	—
SIZE <div>A4</div>				E	—
				D	—
				C	—
SCALE <div>1:1</div>	WEIGHT (kg) <div>XXX</div>	DRAWING NUMBER <div>Dedo Indice Prototipo 1.0</div>	SHEET <div>1/1</div>	B	—
This drawing is our property; it can't be reproduced or communicated without our written agreement.				A	—

This drawing is our property; it can't be reproduced or communicated without our written agreement.



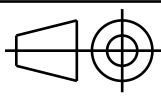
DESIGNED BY:
Jorge

DATE:
21/06/2014

CHECKED BY:
XXX

DATE:
XXX

SIZE
A4



SCALE
1:1

WEIGHT (kg)

DRAWING NUMBER
Prototipo 2.0

SHEET
1/1

I	—
H	—
G	—
F	—
E	—
D	—
C	—
B	—
A	—

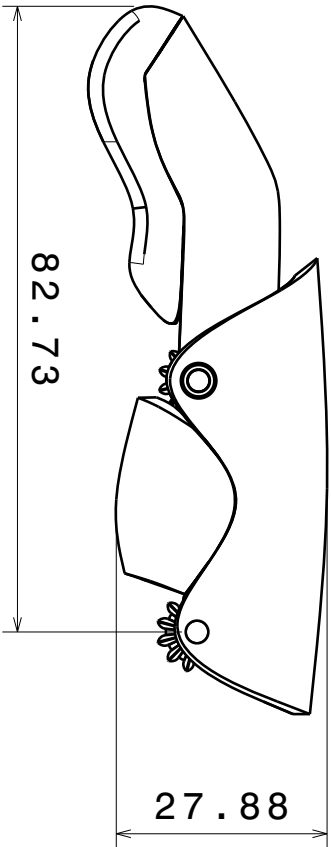
This drawing is our property; it can't be reproduced or communicated without our written agreement.

D

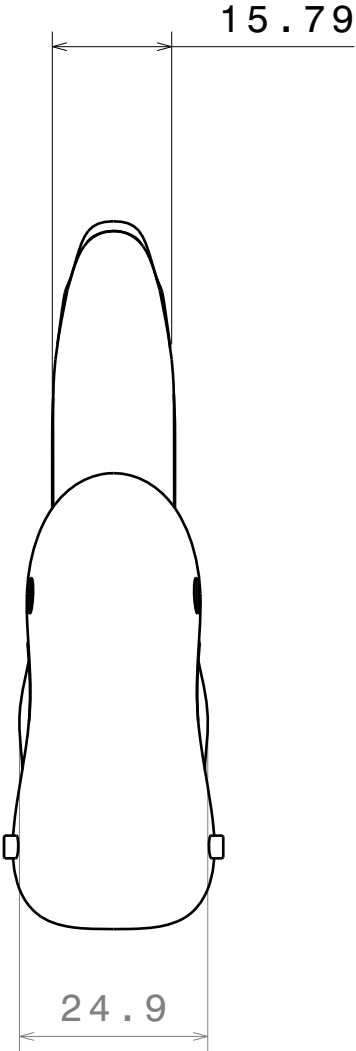
C

B

A



Front view
Scale: 1:1



Top view
Scale: 1:1

DESIGNED BY:

Jorge

DATE:

21/06/2014

CHECKED BY:

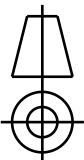
XXX

DATE:

XXX

SIZE

A4



SCALE

1:1

WEIGHT (kg)

DRAWING NUMBER

Indice - Distal

SHEET

1 / 1

This drawing is our property; it can't be reproduced or communicated without our written agreement.

1

2

3

4

1

2

3

4

D

A

4

4

3

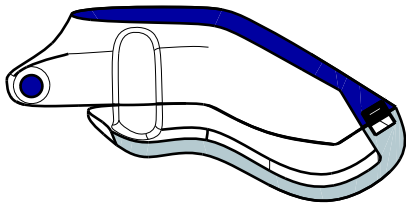
3

2

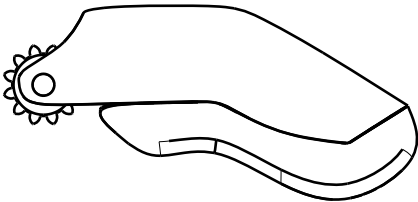
2

1

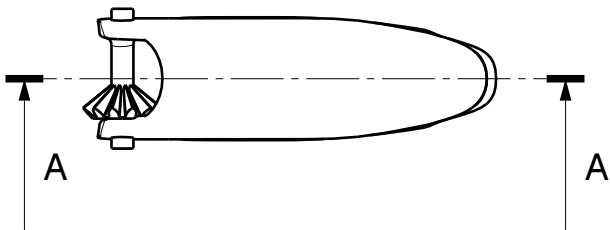
1



Section view A-A
Scale: 1:1



Front view
Scale: 1:1

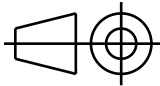


Top view
Scale: 1:1

DESIGNED BY:
Jorge
DATE:
21/06/2014

CHECKED BY:
XXX
DATE:
XXX

SIZE
A4



SCALE
1:1

WEIGHT (kg)

DRAWING NUMBER
Indice - Distal

SHEET
1/1

I	—
H	—
G	—
F	—
E	—
D	—
C	—
B	—
A	—

This drawing is our property; it can't be reproduced or communicated without our written agreement.

D

A

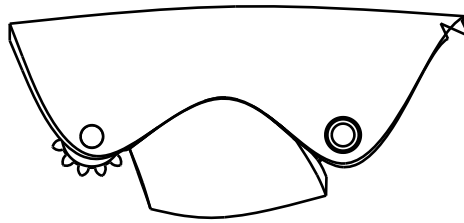
D

C

B

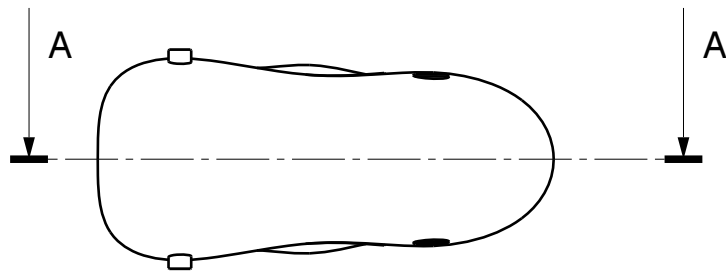
A

4



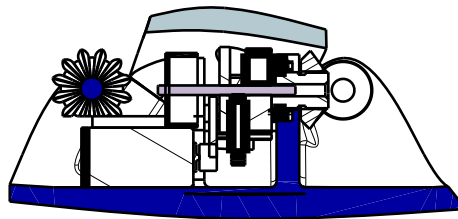
Front view
Scale: 1:1

3



Top view
Scale: 1:1

2



Section view A-A
Scale: 1:1

4

3

2

DESIGNED BY:

Jorge

DATE:

21/06/2014

CHECKED BY:

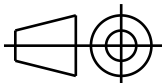
XXX

DATE:

XXX

SIZE

A4



SCALE

1:1

WEIGHT (kg)

DRAWING NUMBER

Indice - Proximal

SHEET

1/1

I

-

H

-

G

-

F

-

E

-

D

-

C

-

B

-

A

-

This drawing is our property; it can't be reproduced or communicated without our written agreement.

D

A

1